UNIVERSIDAD DE SALAMANCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y
AMBIENTALES

Departamento de Física General y de la Atmósfera
Área de Tecnologías del Medio Ambiente

**LA FÍSICA DE UN ÍNDICE PREDICTIVO DE
RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES**

Santiago Domínguez Martín

Salamanca Junio de 2008

LA FÍSICA DE UN ÍNDICE PREDICTIVO DE RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES

Memoria para optar al Grado de Doctor

Presentada por el Licenciado en Ciencias Ambientales

Santiago Domínguez Martín

Salamanca Junio de 2008

EULOGIO LUIS GARCÍA DÍEZ, PROFESOR TITULAR DEL DEPARTAMENTO DE FÍSICA GENERAL Y DE LA ATMÓSFERA DEL ÁREA DE TECNOLOGÍAS DEL MEDIO AMBIENTE DE LA UNIVERSIDAD DE SALAMANCA.

CERTIFICO: Que el Licenciado Santiago Domínguez Martín ha realizado, en el Departamento de Física General y de la Atmósfera en el Área de Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad de Salamanca, bajo mi dirección, la tesis: “LA FÍSICA DE UN ÍNDICE PREDICTIVO DE RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES”, para optar al Grado de Doctor.

Y para que así conste a efectos de presentación y defensa pública firmo la presente certificación en Salamanca a 16 de junio de dos mil ocho.

Agradecimientos

En primer lugar quiero mostrar mi más sincera gratitud al profesor Eulogio Luis García Díez por las aportaciones tanto científicas como humanas que ha dirigido a mi persona antes y durante la elaboración de la Tesis. Porque nada sería posible si no te abren las puertas, y el profesor Eulogio me las abrió y me sentó a trabajar a su lado. He tenido maestro. Gracias Eulogio.

De la misma manera quisiera agradecer profundamente a los miembros del Departamento de Física General y del Atmósfera su impecable diligencia, trato y continuo apoyo en la elaboración de este trabajo. Especialmente quisiera dar las gracias a cuantas personas han trabajado junto a mí en el Área de Tecnologías del Medio Ambiente y que sin su contribución nada hubiera sido posible, por ello, gracias a Cristina, Esther y Lucía.

Gracias a los profesores de la Universidad de Salamanca Cipriano Valle y José Abel Flores, y al Dr. Brian E. Potter del USDA Forest Service (USA) por su aportación científica hacia mi persona. También gracias a los miembros de la Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales por su trato cordial y apoyo.

Desde aquí agradezco a cuantas instituciones me han brindado la oportunidad de realizar esta satisfactoria actividad de investigación, en primer lugar a la Universidad de Salamanca por la concesión de mi beca, y a la Junta de Castilla y León y Ministerio de Ciencia y Tecnología por la financiación de proyectos.

No podría olvidar el agradecimiento a las fuentes de datos utilizadas en este trabajo como el INM (Ahora Agencia Estatal de Meteorología), el servidor del ECMWF, la Universidad de Wyoming, MetOffice, NOAA, el Ministerio de Medio Ambiente y el Parque de Bomberos de Salamanca.

Para finalizar tengo que agradecer a los responsables de que esté aquí, no solo en este mundo, sino también a poder optar al grado académico de doctor, y es a mi familia especialmente a mis padres y a mi hermana. Gracias también a Teresa que me apoyó desde el principio en todo, ayudándome para que el camino sea más llevadero.

“Creo en lo inevitable, pero no en eso que llaman destino, no puede ser que todo lo que sucede sea un burdo juego al azar”.

A mis padres

FOTO: Santiago Domínguez Martín

*A todas aquellas personas
que han perdido la vida
en la lucha antifuego*

ÍNDICE:

	PÁG
INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes: Breve introducción histórica.....	8
Revisión de la bibliografía sobre el tema hasta la actualidad	11
 CAPÍTULO I: LEGISLACIÓN Y ÁMBITO DE GESTIÓN	40
I.1. Legislación y gestión de ámbito comunitario.....	41
I.2. Legislación y gestión en el ámbito del Estado Español.....	47
I.3. Legislación y gestión de ámbito autonómico.....	56
I.3.1. Normativa en Galicia.....	56
I.3.2. Normativa en Castilla y León.....	60
 CAPÍTULO II: DESCRIPCIONES CLÁSICAS	69
II.1. Aspectos históricos.....	70
II.2. Características de los combustibles.....	76
II.3. La evaporación en la atmósfera.....	90
II.4. La Evapotranspiración y el balance hídrico.....	96
II.5. La Vegetación	102
 CAPÍTULO III: LA LUCHA ANTIFUEGO.....	114
III.1. Estadísticas: comentarios.....	115
III.1.1. Impacto causado por los incendios.....	125
III.2. Gestión de Incendios.....	132

	PÁG
III.2.1 Prevención.....	132
III.2.2. Extinción.....	142
III.2.3. Planificación y estrategias.....	148
 CAPÍTULO IV: LA FÍSICA DEL FUEGO	 158
IV.1. El fuego como problema físico-meteorológico.	159
IV.2. El fuego como dinámica vertical de la columna atmosférica.....	160
IV.2.1. La estabilidad atmosférica: formas varias de análisis.....	160
IV.2.2. Estabilidad y dinámica vertical.....	164
IV.2.3. Conexión con la dinámica horizontal.....	172
IV.3. El viento como factor influyente en la dinámica del fuego.....	173
IV.4. La humedad atmosférica: Su determinación e importancia.....	174
IV.5. Los Diagramas aerológicos: herramienta del estudio meteorológico del fuego.....	178
IV.6. La convección y el fuego	181
 CAPÍTULO V: BASES DE DATOS CONSIDERADAS.....	 196
V.1. Datos meteorológicos.....	197
V.1.1. Radiosondeos convencionales.....	197
V.1.2. Otros datos consultados.....	217
V.1.3. Datos de Precipitación.....	218
V.2. Datos de Incendios.....	218

CAPÍTULO VI: ÍNDICES DE RIESGO DE FUEGO:

ANÁLISIS COMPARATIVOS.....	221
VI.1. El modelo GD.....	222
VI.1.1 Base física.....	223
VI.1.2. Validación.....	225
VI.2. Índice de Haines (LASI).....	240
VI.3. Índice Canadiense de Fuego (FWI)	246
VI.4. Otros Índices de riesgo.....	258
VI.5. Índices complementarios.....	272

CAPÍTULO VII: OTRAS ESCALAS METEOROLÓGICAS..... 285

VII.1. Escala planetaria: El Niño y los incendios en Galicia.....	286
VII.2. Índice NAO (North Atlantic Oscillation) y riesgo de fuego.....	289
VII.3. El fuego a escala sinóptica: Efectos dipolares.....	291

CAPÍTULO VIII: EL MODELO GD A ESCALA REGIONAL..... 297

VIII.1. Tendencias generales de la diada (e ,D) en zonas costeras y continentales.....	298
VIII.2. Modelo GD para Extremadura.....	303
VIII.3. Modelo GD para Guadalajara.....	304

CAPÍTULO IX: ANÁLISIS DE ALGUNOS EVENTOS

DE FUEGO PARTICULARES.....	305
IX.1. Episodio Guadalajara (del 16 de julio al 2 de agosto de 2005).....	306

	PÁG
IX.2. Episodio del 14 al 20 de marzo de 2005 en el norte y noroeste de la Península.....	319
IX.3. Episodio del 4 al 14 de agosto de 2006 en Galicia.....	323
IX.4. Incendio del edificio Windsor del 13 febrero de 2005.....	325
 CAPÍTULO X: PROPUESTAS DE MEJORA DEL MODELO GD	 329
X.1. El problema de los días tipo II.....	330
X.2. La Troposfera como un único estrato	348
X.3. Modificación en la parametrización de las ecuaciones.....	350
X.4. Aplicabilidad espacial universal del modelo GD.....	351
X.5. Flujos dipolares: posibilidad de modelo objetivo.....	353
X.6. Refinamiento mesoescalar del modelo GD	355
 EPÍLOGO: FUEGO Y CAMBIO CLIMÁTICO.....	 358
 CONCLUSIONES.....	 381
 BIBLIOGRAFÍA.....	 385

INTRODUCCIÓN

El problema del fuego ha ido cambiando en acepción a lo largo de las dos últimas décadas. Del inicial concepto de incendio forestal, asociado a que el combustible eran especies forestales determinadas, se pasó al de incendio silvestre donde el sistema a considerar era la cubierta vegetal en sí misma. Hace una década se empezó a hablar de incendios de interfase, y con ello, se admitía que el problema del fuego está asociado a la discontinuidad (interfase) urbanismo-cubierta vegetal. Hoy ya se habla de forma diáfana del fuego como un problema global, considerando incluso la posibilidad de escenarios urbanos. ¿Qué significa este cambio de acepción? Evidentemente, más allá de una simple cuestión semántica, se trata de admitir que la cubierta vegetal, en sus más variadas escalas, no es más que una superficie que presenta alta combustibilidad, de igual manera que puede ocurrir en el propio suelo urbano. Conceptualmente, y entrando en un análisis más profundo, esta evolución en las acepciones no ha hecho más que situar el problema del fuego en su justo contexto: suelo combustible-atmósfera. El suelo, la atmósfera y la actividad antropogénica constituyen todo un triángulo de fuego. En relación a la actividad antrópica, es evidente que la convivencia sociedad-cubierta vegetal es causa directa o indirecta de fuego. El hombre, la sociedad, evoluciona en el tiempo según lo que comúnmente denominamos desarrollo. De todas las definiciones que pudieran darse de desarrollo la que hace más al tema es la que considera que el desarrollo es pura y llanamente más y más fuentes de calor en el devenir del tiempo. Una región está más desarrollada que otra cuando tiene más fuentes de calor. En resumen, la evolución semántica surgida no ha hecho más que acercar el inicial problema del fuego en los bosques a la sociedad en desarrollo.

Normalmente suelen ser los ámbitos subdesarrollados los que provocan (o sufren) consecuencias medioambientales adversas, pues bien, al contrario, el problema del fuego es un problema de desarrollo y, por ello, aparece con más intensidad en los países desarrollados. Un ejemplo paradigmático podría ser Galicia (España), donde se ha observado una tendencia al alza del número de incendios en los aproximadamente últimos 20 años.

La explosión demográfica y las nuevas formas de disposición urbanística han generado la necesidad de ocupar zonas antes deshabitadas, aumentando la superficie de contacto con el medio silvestre. La tendencia de la sociedad moderna es a establecerse en áreas residenciales periféricas a las ciudades invadiendo áreas hasta ahora dedicadas a usos forestales, ganaderos o agrícolas. Es bien sabido que, cuanto mayor sea la superficie de cubierta vegetal, mayor riesgo de fuego. Si esas áreas pseudo-urbanas se encuentran en

regiones con condiciones climáticas proclives a la formación de grandes masas forestales, el riesgo de incendios se multiplica. Tal y como sucede en Galicia u otras regiones mundialmente conocidas por sus eventos extremos de fuego como California, Florida, costa este australiana, etc.

Otro efecto a considerar es la dejación de actividad en el monte por el descenso en el medio rural de las actividades forestales tradicionales que mantenían el bosque libre de combustible fino, que es en el que surgen la mayoría de los incendios. Cuando insinuamos el abandono no se corresponde exactamente con el conocido éxodo rural, sino a la estricta dejación de las actividades culturales. Además de por la falta de mano de obra, algunas actividades han dejado de realizarse por su escasa rentabilidad. Por ejemplo, en un porcentaje muy alto las encinas y robles han dejado de ser desmochados y olivados para la obtención de leña en determinadas regiones y eso ha producido una gran cantidad de combustible disponible en el monte. Otros ejemplos son la escasez de ganado ramoneador, la introducción de especies forestales menos adaptadas etc.

Podemos hablar, por tanto, de una “convivencia” de un subsistema urbanístico con actividad creciente con una cubierta vegetal generalmente más pasiva con el paso del tiempo. Esta convivencia, es evidente, tiene una tendencia de futuro favorable a la aparición del fuego. Y especialmente acusado será el problema donde la convivencia se torne más íntima progresivamente.

En España los incendios aparecen con más alta frecuencia en toda la periferia peninsular destacando el Noroeste. Parece, por tanto, que la aparición de fuego y la proximidad al mar guardan evidente relación. Una justificación sería que los incendios predominan en las zonas de influencia climática marítima por la existencia de una mayor cubierta vegetal y, por tanto, más actividad de fuego. La otra razón es la extraordinaria diferencia de comportamiento meteorológico que hay según la dirección de llegada de masas de aire a ellas.

En los trabajos de investigación previos a la presente tesis fue demostrada la existencia de un sincronismo en la aparición del fuego en áreas regionales del noroeste de la Península Ibérica. El fuego, como fenómeno, aparece a oleadas en determinados días en toda una región mesoescalar de manera simultánea. Y aquel sincronismo no sólo era a escala diaria sino también mensual e incluso estacional. Todo ello nos indica que en aquella región los incendios surgen bajo unas determinadas condiciones compartidas con independencia de la organización administrativa del territorio. Así se observó entre Galicia ,León, Zamora , Salamanca y Tras os Montes en Portugal.

En climas húmedos de la Península Ibérica como es el caso del noroeste peninsular, el fuego de cubierta vegetal acontece cuando las condiciones meteorológicas, de escala espaciotemporal más pequeña, entran en oposición a las climatológicas, de escala más grande. Así, mientras éstas favorecen la existencia de cubierta vegetal en aquellos sitios de humedad y temperatura conveniente, son las condiciones meteorológicas opuestas (sequedad e inestabilidad) las que, cuando acontecen, conllevan la aparición del fuego. Por esta razón, y sólo por ésta, pueden acontecer incendios en cualquier época del año. En particular, es bien conocido el máximo secundario de incendios que se registra a lo largo de los meses de febrero y marzo en esta región del noroeste de la Península Ibérica. Todas estas consideraciones serían muy útiles en la distribución de medios y en las medidas de gestión antifuego.

La gestión se enfoca desde las administraciones competentes elaborando programas y planes de lucha contra el fuego en dos niveles : Prevención y Extinción.

En la Prevención se encuentran acciones como la eliminación de restos vegetales muertos y materiales susceptibles de ignición, situados en el sustrato próximo a la superficie forestal, así como desbroces y eliminación de estratos herbáceo y arbustivo para reducir la masa de combustible. Otras acciones dentro de la prevención serían todas aquellas encaminadas a las labores de educación ambiental para los diferentes grupos de destinatarios que habitan la zona. Esta última acción suele ir, dependiendo de la comunidad autónoma, desde campañas informativas a base de trípticos, hasta charlas explicativas dirigidas sobre todo a agricultores, ganaderos, etc.

En la Extinción entran en juego todas las actividades dirigidas a la sofocación y minimización de daños de los incendios ya iniciados, dentro de las que tienen un enorme peso los medios disponibles que puedan llevarlas a cabo. Disponibilidad y eficacia de los medios terrestres y aéreos en las tareas de extinción, son los dos grandes pilares de una adecuada gestión en la extinción.

La predicción y la alarma meteorológica del riesgo de fuego mediante el uso de diferentes índices es otra de las medidas que muchos autores incluyen en la prevención, no obstante es discutible ese hecho ya que puede ejercer una mayor utilidad en las tareas inmediatamente previas a la extinción (en la disponibilidad y distribución de medios para sofocar el fuego). Sea cual sea el lugar donde la ubiquemos en el ámbito de gestión, la predicción del riesgo es una herramienta básica en la lucha contra los incendios. La presente tesis va dirigida en una gran proporción a conseguir que se cumpla con eficacia la parte predictiva del riesgo de fuego en la gestión.

La redacción de normativa cumple una labor preventiva, por ejemplo, ciertas normas administrativas encaminadas a regular actuaciones forestales como podas, desbroces, o quema de rastrojos limitan a ciertas épocas y bajo determinadas condiciones la realización de dichas actuaciones con el fin de minimizar potenciales causas de fuego.

El código penal español tipificando el denominado delito ecológico está tratando de prevenir delitos inherentes al fenómeno delictivo de la provocación del fuego, al establecer penas incluso de cárcel dependiendo de los agravantes que concurran. Ello tiene como fin inducir una preocupación en la conciencia social por los incendios forestales. Ya sea por dolo o por negligencia, la persona que provoca un incendio puede ser condenada y ello trata, en cierta manera, de disuadir a cualquier otra a perpetrar un delito similar.

Todo este entorno normativo y sancionador tiene como consecuencias que la búsqueda de la persona causante y , por lo tanto, responsable único del fuego, sea una de las prioridades de las autoridades en la resolución del problema.

Según datos estadísticos del Comité de Lucha contra incendios Forestales (CLIF, 1997) resultado de encuestas realizadas, las causas de incendios en España se distribuyen porcentualmente de la siguiente manera: Rayo y otras causas fortuitas un 5%, intencionados un 60 %, negligencias un 15 %, y causas desconocidas un 20 %.

Un 20 % de los incendios tienen una causa desconocida y resulta imposible encontrar un responsable. Eso supondría por ejemplo para un año de Galicia, como el de 1998, que un total de 1793 incendios tuvieran una causa desconocida.

Dentro del 75 % de causa antrópica conocida, la persona responsable causante del incendio puede ser por negligencia o con intención. Si es por negligencia (15 %) suele ser por quema de rastrojos, hogueras, barbacoas, pero también negligencias son los escapes de vertederos y trabajos forestales que son de responsabilidad de la administración.

Entre los que cometen un delito doloso (60 %) conviene diferenciar los llamados incendiarios y los pirómanos patológicos. Los incendiarios realizan el delito en plenitud de facultades psíquicas y buscan un fin como venganzas, vandalismo, diversión, cambios en usos de suelo, urbanismo, intereses madereros o incluso, aunque en menor medida, como protesta por las restricciones en espacios protegidos, caza, contrabando, animadversión hacia la administración, intereses laborales de las brigadas y cuadrillas, etc. Este tipo de personas suele estudiar muy bien las condiciones adecuadas para que el fuego progrese y la eficacia de su acción.

Los pirómanos ya son personas con patologías psíquicas que cometen los incendios con un fin nada que ver con ninguno de los objetivos anteriores, sino que únicamente por satisfacción personal. En este caso la idoneidad de las condiciones no son tan esmeradas, y se podría decir que este tipo de personas son un efecto causal constante a lo largo del año, sin diferenciar días favorecedores del fuego.

La búsqueda de responsables de delitos ecológicos es una labor fundamental, pero año tras año, a pesar de las detenciones, el fenómeno sigue apareciendo. Sin cejar en la tarea de hallar a los culpables, si los hubiere, está claro que el fenómeno del fuego como proceso ambiental, debe ser estudiado en profundidad para tratar de conocerlo mejor, y así saber cuándo y en qué condiciones puede aparecer, a fin de minimizar los efectos negativos que pueda producir en el futuro. Es un fenómeno que seguirá presente (y además de forma creciente) en el medio ambiente sean cual sean las causas, y dada su existencia, lo que un gestor puede hacer es tratar que los daños que se produzcan sean los menores posibles para preservar los valores naturales y antrópicos del lugar.

Los medios de comunicación juegan un papel fundamental en la difusión de la información ambiental entre la población. De esta manera los eventos de fuego, sus causas y consecuencias son puestos en conocimiento de la sociedad a través de ventanas mediáticas como la prensa escrita, la televisión, la radio etc. No es objetivo de esta tesis entrar a debatir la conveniencia o no de que los medios de comunicación sean los encargados de difundir los problemas ambientales, y si lo hacen de forma adecuada o no. No obstante sería conveniente decir que en ocasiones la información que aportan sobre los incendios es sesgada, no añadiendo otros datos de gran relevancia en el fenómeno del fuego que ayudarían a entender mejor el problema por la sociedad. Este hecho es un denominador común encontrado en varias ocasiones, como fue el caso del incendio de Guadalajara de julio de 2005, y que será suficientemente tratado en esta tesis. Si la sociedad comprende mejor el problema, podrá exigir a la administración una mejor gestión, y que éste no sea tratado como un fenómeno aleatorio impredecible. La difusión de la realidad del problema debería ser un compromiso a tomar en cuenta.

Está claro que los incendios forestales se han convertido en un elemento más de la problemática ambiental a nivel mundial. Es un fenómeno que actúa por varios flancos, influyendo en los problemas propios de las emisiones a la atmósfera. Los incendios emiten CO₂ y otros contaminantes a la atmósfera en enormes cantidades, y tienen mucho que decir en el problema del calentamiento excesivo por efecto invernadero. Por otro lado está el problema que generan de deforestación, con las consiguientes pérdidas

de biodiversidad, contaminación de las aguas y desertificación. Es un problema con consecuencias muy diversas e interrelacionadas entre sí. Todas ellas son importantísimas, pero quizás, la que más llame la atención sea la propia de las emisiones de efecto invernadero. En un incendio se emiten muchas toneladas de CO_2 a la atmósfera que no están siendo computadas como cuotas de emisión de los países, al igual que no se computan los sumideros de CO_2 . El CO_2 y el vapor de agua emitidos en un incendio son gases de efecto invernadero que son devueltos a la atmósfera desde los sumideros forestales. Es un proceso natural que ha existido siempre, pero si se acelera puede provocar variaciones en el balance de gases invernadero en la atmósfera y favorecer el tan muchas veces mencionado calentamiento global. Por lo tanto, el fuego es un problema que requiere ser abordado.

La presente tesis trata de abordar una teoría general del fuego que explique desde un punto de vista físico-meteorológico la aparición de los incendios, y así contribuir a elaborar y mejorar modelos adecuados de predicción, que definan el riesgo de fuego a priori, en diferentes regiones de la Península Ibérica.

De ese modo, el modelo GD de predicción de riesgo de fuego (presentado en la bibliografía) elaborado y validado por este equipo investigador, será aplicado, y valorado su funcionamiento cualitativo y cuantitativo para regiones como Galicia y la unidad geográfica del oeste de Castilla y León (León, Zamora y Salamanca). El modelo también se aplicará para Extremadura, Madrid y Guadalajara. Completando así la validación del modelo GD hasta los datos disponibles en la actualidad, y ampliando su validación a otras regiones. Por otro lado, la regionalización de dicho índice es estudiada para comparar las diferencias o similitudes que puedan existir de utilizar La Coruña o Madrid-Barajas como estación de radiosondeo. Además la aplicación del modelo GD en zonas costeras o continentales puede tener muchas semejanzas que son mostradas también aquí.

Centrándonos en Galicia se estudiarán diferentes índices meteorológicos utilizados frecuentemente en la red de la WMO para tratar de encontrar las relaciones que puedan tener con el modelo GD de predicción de fuego. Además de estos índices puramente meteorológicos, otros índices de predicción del riesgo de fuego utilizados mundialmente son aplicados para Galicia y comparados con el GD. De esa comparación se deduce un análisis crítico de tales índices.

Fenómenos meteorológicos a macroescala como es el fenómeno del Niño podrían guardar alguna relación con los incendios registrados en la región de Galicia. Aquí serán presentados los resultados de tal hipotética relación.

Una aportación singular de esta tesis está centrada en buscar, y encontrar, nuevos planteamientos teóricos que refuerzan el significado físico del índice GD. Nos estamos refiriendo a establecer una correcta interpretación de dicho índice en el contexto minucioso de desarrollo convectivo. Conceptos puros de termodinámica de desarrollo cumular, como CAPE, CIN, etc son relacionados con los parámetros del modelo GD. Sobre todos, hay que destacar los nuevos conceptos como “Supertiro”, “poder de penetración vertical del fuego” y determinación del LCL (Lifted Condensation Level), de gran influencia en la conducta y aparición del fuego, que aparecen públicamente por vez primera en esta tesis.

Desde un punto de vista de dinámica horizontal, varias técnicas son incluidas para determinar la advección de masas secas, etc.

En un sentido de clara aplicación práctica, varios episodios de fuego acontecidos en diferentes regiones de la Península durante 2005, 2006 y 2007 son analizados y presentados desde un punto de vista meteorológico y de aplicación del modelo GD. Especial mención se realizará en esta tesis del episodio de Guadalajara de julio de 2005, donde se estudiarán extensamente y en profundidad las circunstancias meteorológicas que dieron lugar a la existencia de un riesgo elevado de fuego. El incendio del edificio Windsor en febrero de 2005, como ejemplo de incendio urbano, es también mostrado aquí con un análisis meteorológico de la situación existente. En el ámbito de los incendios urbanos será estudiado el sincronismo entre los incendios silvestres en la provincia de Salamanca y los incendios acontecidos en la ciudad.

Como colofón varias propuestas del mejora del modelo GD son presentadas aquí.

De esta forma cerramos esta tesis, tratando de plasmar en ella nuestra inicial intención: una descripción físico-meteorológica del fuego.

Antecedentes: Breve introducción histórica

Desde el segundo cuarto del siglo XX la problemática de los incendios en países como Canadá, Estados Unidos, Australia y Nueva Zelanda comenzó a cobrar importancia, y se realizaron los primeros estudios sobre la determinación de un riesgo de fuego que fue el origen de los sistemas canadiense y americano de detección del peligro de incendio. Fue el punto de partida de la investigación científica sobre un fenómeno que hasta

aquellos días era considerado como un proceso azaroso, y que a partir de entonces iba a ser estudiado desde diversas perspectivas que mostraremos aquí. Una de las vertientes más consideradas en la bibliografía, y compartida por nosotros, será la físico-meteorológica. En este sentido los incendios son eventos que acontecen en el nivel más bajo de la atmósfera, y por tanto, deben ser estudiados en relación a las propiedades de la superficie de discontinuidad suelo-atmósfera. Este planteamiento de considerar el fuego como un fenómeno que acontece en el nivel inferior de la atmósfera, precisamente llevó a Nesterov en la década de los 30 a la redacción del primer gran documento que sobre la materia distribuyó la Organización Meteorológica Mundial (OMM, WMO) (Nesterov 1939). Nosotros compartimos esta orientación en el estudio de los incendios. La física es la única herramienta conceptual que puede explicarnos de una forma ordenada las razones de la aparición del fenómeno en superficie. En esta línea, en las décadas de 1980 y 1990, aparecen muy diversas concepciones del problema como Brotak, Stocks y Haines.

No obstante existen otros puntos de vista de la concepción del problema que no son estrictamente físicos y que tratan de explicar la fenomenología estadísticamente, sin ningún fundamento causal o determinista que lo sustente. En este sentido algunos autores se lanzan a la construcción de índices numéricos que incluyen valores de diversos parámetros meteorológicos conectados sin lógica física (Orioux 1979, Carrega 1987, etc.). Por otro lado a lo largo del siglo XX se desarrollan los conocidos índices de peligro nacionales (NDFRS, BEHAVE en USA, FWI de Canadá y el FFDM de Australia). Estos índices hacen valoraciones globales, derivados de consideraciones estadísticas, pero no abordan de manera física el proceso del fuego.

El modelo de Haines (1988), a diferencia de los anteriores, es un índice que considera el problema del fuego como una dinámica vertical a escala meso. La filosofía básica de Haines es compartida por nosotros pero consideramos que carece de una adecuada construcción formal. Otros muchos autores como Potter (2001), Potter y Martin (2001), Potter et al (2003) y Jenkins (2002), (2004) han estudiado la idoneidad del índice de Haines y han propuesto mejoras desde el punto de vista termodinámico en la atmósfera más cercana a la superficie.

El índice predictor GD de incendios, e investigaciones derivadas de él (García Díez et al. 1994a), parte de la idea de que el fuego es una dinámica vertical, tal y como plantea Haines y, en consecuencia, el formulismo que se aplica en él es el que convencionalmente se usa en el desarrollo convectivo. Ocurre que dicho formulismo está, generalmente, orientado a determinar condiciones de convección húmeda (tormentas), pero nuestro problema lo está a la determinación de convección seca en el lugar. La diferencia entre GD y Haines estriba en que la construcción del modelo GD se adapta mejor a la realidad del fuego, algo que, si ya fue insinuado en trabajos precedentes queda aquí plasmado con todo rigor.

El modelo GD al sostenerse sobre fundamentos físicos, puede relacionarse bien con cualquier análisis termodinámico y energético que pueda realizarse, como los propuestos por Rivas Soriano y García Díez (1993) y Rivas Soriano et al (1994) o los considerados por otros autores entre los que destacamos Arakawa y Schubert (1974) y Lord y Arakawa (1980) o Potter y Jenkins, ya citados anteriormente. Además, la escala meso del modelo GD puede enlazarse con escalas mayores, como la sinóptica, considerada por Brotak (1977, 1980, 1993), y Brotak y Reifsnnyder (1977), en el análisis del riesgo de fuego, pudiendo elaborarse modelos objetivos que las conecten.

El pronóstico meteorológico de salida en algunos de los modelos numéricos existentes ha contribuido de manera positiva a mejorar la predicción del llamado riesgo de fuego. Con una buena predicción del tiempo meteorológico, ensamblada a un buen modelo objetivo de detección de riesgo de fuego y del número de incendios, pueden mejorarse las tareas en los programas de lucha contra el fuego. Pero a veces con ello no es suficiente debido a que los modelos numéricos pueden arrastrar errores, o porque haya situaciones excepcionales que el modelo no sea capaz de detectar; para eso está la labor del gestor, que debe conocer el fenómeno adecuadamente para tomar la decisión más eficaz.

Existen muchas corrientes que se han dedicado al estudio de la ocurrencia, desarrollo, comportamiento, causas y consecuencias de los incendios forestales. Para adquirir una visión general, sin profundizar demasiado en las corrientes que no son de nuestro especial interés, es conveniente realizar una revisión de la bibliografía. Haremos

especial hincapié en la que considera al fenómeno como un proceso físico en la atmósfera.

Revisión de la bibliografía sobre el tema hasta la actualidad.

Los incendios han sido un problema estudiado en la bibliografía desde diferentes orientaciones, algunas de las cuales mostramos a continuación. La más considerada por este grupo investigador es la que estudia el problema desde un punto de vista físico atmosférico pero existen otros que siguen criterios estadísticos, empíricos, etc.

La bibliografía analizada versa sobre las siguientes temáticas: Estabilidad en la atmósfera y otras condiciones en los incendios, índices meteorológicos que pueden utilizarse en la detección de riesgo de fuego, índices de peligro de fuego desarrollados, modelos de conducta y propagación de fuego, condiciones frente a área quemada, causas del fuego, la evapotranspiración como fenómeno favorecedor del fuego, impactos ambientales de los incendios, el modelo GD desarrollado por este grupo de investigación a lo largo de 20 años, modelos de predicción meteorológica, modelización del riesgo en escenarios futuros y gestión y toma de decisiones.

Estudio de la estabilidad de la atmósfera y otras condiciones asociadas a los incendios

Una de las líneas de investigación sobre los incendios se ha orientado hacia el estudio de las diferentes condiciones meteorológicas que determinan la aparición de los incendios. El problema del inicio del fuego y su relación con las condiciones meteorológicas de la columna atmosférica ha sido una materia muy tratada en la bibliografía ya desde mediados del siglo XX. Inicialmente Byram y Jemison (1943), Byram (1954),(1959a)(1959b) y posteriormente Nelson (1993) estudiaron el efecto de las condiciones atmosféricas y de la convección o flujo vertical sobre las áreas donde se estaban produciendo grandes incendios. Establecieron metodologías suponiendo una atmósfera neutra que relacionaban el flujo vertical con el flujo horizontal durante un incendio, con el fin de indicar las conductas erráticas que el fuego podía adquirir. Cuando la energía cinética del movimiento vertical excede a la energía cinética del movimiento horizontal las condiciones erráticas del fuego se hacen patentes en el proceso de propagación. Nelson (1994, 2003) generaliza estos estudios para ascensos no adiabáticos en atmósfera no neutra (estable o inestable), y refleja las restricciones de las metodologías de Byram, que se limitaban a describir un ascenso adiabático ignorando el

posible variación de masa de una burbuja que asciende. La nueva metodología de Nelson (2003) afirma que el flujo vertical sobre un incendio no puede considerarse como un ascenso adiabático porque se realizan intercambios de masa y energía con el entorno. Además sus nuevas ecuaciones son aplicables siempre que no se produzca el proceso de condensación del vapor de agua, por eso es aplicable sólo en niveles cercanos a la superficie, a diferencia que Byram que se extendían a mayor altura.

Brotak y Reifsnyder (1977), Brotak (1977), (1980), (1993) en diferentes trabajos estudiaron la meteorología asociada a los grandes incendios en Estados Unidos así como en Canadá y Australia. Brotak (1977) en un sentido bastante extenso analizó la meteorología asociada a los 98 incendios más grandes acontecidos en los Estados Unidos, y pudo determinar que cerca del 90 % de los incendios estuvieron asociados a situaciones de fuertes gradientes de presión en la zona, con bajas presiones en altura (500 hPa), escasez de humedad en 850 hPa, insuficiente para generar precipitación, e inestabilidad en la columna atmosférica.

Brotak y Reifsnyder (1977) elaboraron un estudio en el E de Estados Unidos cuyo objetivo principal fue determinar las situaciones de tiempo sinóptico asociadas con los 42 incendios más grandes allí registrados, concretamente las condiciones del aire tanto en superficie como en altura que son necesarias para el desarrollo de grandes incendios. Se trata del primer estudio en el que se analizan situaciones a escala sinóptica en superficie y en altura, y se relacionan con la ocurrencia de incendios. Schroeder (1964) hizo un estudio similar pero sólo trató medianamente tipos de masas de aire. Según Brotak y Reifsnyder (1977) la ocurrencia de los mayores incendios se presentaron bajo situaciones sinópticas muy especiales, como por ejemplo situaciones frontales con ausencia de precipitación y fuerte viento, ascensiones de aire, etc. Plantean que a partir de mapas predichos de superficie y en altura (fácilmente accesibles) podrían determinarse las situaciones de alto riesgo de fuego, y ser útiles a la predicción del peligro, con suficiente antelación para los medios de gestión.

En esa línea encontramos también otros autores. Así Alexander y De Groot (1988) analizaron también la relación existente entre la conducta extrema de los incendios con las diferentes condiciones meteorológicas. Stocks (1975) analiza el tiempo de fuego y la

situación de incendios en el NW de Ontario en 1974, centrándose en un análisis meteorológico de dos grandes incendios acontecidos en la zona.

Heilman et al. (2003) analizan la combinación de dos parámetros de mesoescala como son el índice de Haines de detección del riesgo de fuego, que citaremos más adelante, y el parámetro de la energía cinética turbulenta (TKE). La TKE, disponible fácilmente en la predicción, combinada con el índice de Haines es, según estos autores, una buena medida de la conducta extrema de fuego. Altos valores de estos parámetros son característicos de una conducta errática del fuego.

La estabilidad es considerada por muchos autores un parámetro de vital importancia en la actividad del fuego. Jenkins (2002) indica que el propio fuego puede además influir sensiblemente en la atmósfera circundante a través de un proceso de simulación numérica. Estudió el grado de inestabilidad que el propio fuego puede causar en la atmósfera tomando cuatro ejemplos de diferentes combinaciones de los parámetros A y B de Haines (1988). Como en todo proceso de simulación numérica se deben fijar unas condiciones iniciales, que dicha autora centra en días con distinta estabilidad atmosférica. La conclusión a la que llega es que no hay apreciable alteración de la atmósfera circundante por el fuego salvo en uno de los casos elegidos. Dicho caso corresponde a un día de inestabilidad absoluta. Ante este absolutamente infrecuente caso de inestabilidad absoluta, como condición inicial, nosotros apuntamos que la conclusión a la que la autora llega debería ser desglosada en dos componentes. Una de ellas sería la propia dinámica que la inestabilidad absoluta conlleva y la otra la derivada del efecto del incendio.

Además de Jenkins (2002, 2004), Potter (2001) ha desarrollado también comparaciones entre esa estabilidad y el índice de Haines (1988) de riesgo de fuego.

Chunmei et al (2003) realizó un estudio comparativo entre la estabilidad y el comportamiento del fuego. El perfil vertical de temperaturas es representativo de la estabilidad de un lugar, así Chunmei realizó simulaciones en tres situaciones de estabilidad diferentes: neutralidad, estabilidad e inestabilidad, y observó que en atmósfera neutra el frente de fuego era en forma parabólica y las llamas más altas que ante una situación de estabilidad, donde el frente es cónico. Observó que en la atmósfera

inestable el frente es mayor y avanza en varias direcciones, además de que las velocidades ascendentes son las más altas.

Arakawa y Schubert (1974) y Lord y Arakawa (1980) realizaron una parametrización de los procesos convectivos húmedos desde un punto de vista energético muy interesante para la interpretación de la estabilidad y la humedad en la columna atmosférica. Utilizaron diagramas de energías estática seca, húmeda y saturante para evaluar procesos convectivos en la atmósfera húmeda.

En esa línea García et al (1988) estudiaron la actividad convectiva mediante un método basado también en la distribución de la energía estática seca (S), húmeda(h) y húmeda saturante(h^*) calculados a partir de datos de temperatura, geopotencial y humedad específica obtenidos a las 00:00 h. Así, calculan la energía (h^*_{CCL}) a la cual se alcanza el nivel de condensación convectivo. Afirman que cuanto menor sea la energía necesaria para alcanzar desde un h_0 el nivel de condensación convectivo (endoenergía) y mayor el área comprendida entre h^* y h^*_{CCL} (exoenergía) durante el ascenso adiabático, la convección tormentosa es más intensa. Dichos autores utilizaron representaciones gráficas de estos parámetros en la vertical atmosférica, como los que serán utilizados en esta tesis para estudiar la convección que puede originar los incendios.

Coincidiendo con otros autores como Jenkins y Potter en que la inestabilidad seca en la atmósfera guarda relación con el desarrollo de fuego, las interpretaciones de Arakawa y Schubert (1974), Lord y Arakawa (1980) en términos energéticos trasladadas al dominio seco, pensamos que pueden valorar la facilidad de riesgo de fuego, como afirma Rivas Soriano et al (1994), y conectan con los fundamentos del modelo GD.

Diferentes índices meteorológicos

Otra trayectoria de investigación diferente pero que puede guardar una relación con el problema del fuego es la definición de índices físicos de inestabilidad de la columna atmosférica. En la bibliografía (Peppler, 1988) existen multitud de índices meteorológicos la mayoría encaminados a la definición de convección propia de tiempo severo y, por lo tanto, hacen mayor hincapié en condiciones de dominio húmedo. Estos índices en un principio no fueron elaborados para evaluar situaciones de fuego, pero en

ocasiones es factible que puedan ser utilizados para definirlos, ya que los incendios aparecen ante condiciones de inestabilidad convectiva, aunque de dominio seco.

Showalter, (1947, 1953) definió un índice termodinámico que es una medida de la inestabilidad potencial de la atmósfera en el estrato entre 850 y 500 hPa, lo que conlleva deducir el LCL (nivel de condensación forzado) de 850 hPa mediante un análisis aerológico. Otro índice termodinámico es el *Lifted Index* definido por Galway (1956), es una medida de la inestabilidad potencial de la atmósfera entre la superficie y el nivel de 500hPa. Es una versión más afinada del índice de *Showalter*, teniendo en cuenta la humedad del estrato más próximo a la superficie. El *K Index* (George, 1960) es un índice simple derivado del lapso de temperaturas entre 850 y 500 hPa, además de tener en cuenta el contenido de humedad a 850 hPa, así como a 700 hPa, y nos indica el riesgo de tormentas que tenemos sobre una zona, dado en % de probabilidad de tormenta. *Total Totals Index* (Miller, 1967) es un índice simple derivado de un lapso de temperaturas, entre 850 y 500 hPa, y del contenido de humedad, considerando éste como la proporción entre 850 hPa y 500hPa y el contenido de humedad a 850 hPa. CAPE (Convective available Potencial Energy) (Moncrieff y Miller 1976, Emanuel 1994) es la energía potencial convectiva disponible, y para su determinación son necesarios conocer aerológicamente el LFC (Nivel de Libre convección) y el EL (Nivel de Equilibrio). El CIN (Convective Inibition) (Moncrieff y Miller 1976) es otro índice común que puede aportar información útil, pero CIN no es in indicador de la inestabilidad convectiva sino que es la energía potencialmente inhibidora de la convección. Para determinarlo es necesario también un análisis aerológico y situar la superficie y el LFC (Nivel de Libre convección).

En la línea de esos índices, Rivas Soriano y García Díez (1993) demostraron la aplicabilidad de un índice energético de inestabilidad local denominado IR, a partir de datos de radiosondeo de diferentes ciudades europeas. En dicho estudio se relacionaron los valores del índice con la estabilidad de la columna atmosférica, así como la comparación con otros índices como el de Showalter y el Total Totals. Desarrollaron una descripción muy apropiada de la convección en términos energéticos, y presentaron como magnitudes energéticas las llamadas energías estáticas seca (Potencial de Montgomery), húmeda y húmeda saturante. Estas magnitudes han sido usadas por otros

autores para parametrizar procesos cumulares, como hicieron Arakawa y Schubert (1974).

García Díez et al (1987, 1988) ya establecieron anteriormente un método energético operativo que analizaba los fenómenos de inestabilidad propios de procesos convectivos utilizando perfiles verticales de energía estática seca, húmeda y húmeda saturada. Este tipo de perfiles verticales $S(p)$ pueden ser muy útiles para evaluar el estado de la columna atmosférica, por ello serán ampliamente utilizados en capítulos de esta tesis para evaluar situaciones de baja estabilidad propensas al fuego.

Utilizando el modelo de perfiles verticales de Rivas Soriano y García Díez (1993) se define un índice energético de inestabilidad local IR. El IR se diferencia del resto de índices definidos en la bibliografía (Darkow, 1968) en que posee una validez más general, y aunque no sea él de un modelo directo, su fundamento físico puede ser aplicado en el análisis de las situaciones de la columna atmosférica susceptibles de favorecer los incendios. Las situaciones que favorecen el fuego son situaciones de convección atmosférica en dominio seco. En este sentido la base física del IR será utilizada en esta tesis. El índice IR está fundamentado en la definición física de tres parámetros de nivel: Potencial de Montgomery o energía estática seca, energía estática húmeda y energía estática húmeda saturante. Cada uno de los parámetros pueden calcularse para los diferentes niveles de la columna a partir de datos de radiosondeo. Los resultados se representan gráficamente en perfiles verticales $S(p)$ e interpretan de modo similar a los diagramas aerológicos conocidos, con la ventaja que en los diagramas $S(p)$ las áreas equivalen siempre a energías. Partiendo de este tipo de representaciones energéticas, Rivas Soriano y García Díez (1993) proponen una interpretación física suponiendo un ascenso adiabático de la parcela de aire pudiéndose definir niveles como el nivel de condensación convectivo y dos áreas que representan energías. El significado físico del área que ellos definen como A_1 es la energía necesaria para iniciar el proceso convectivo. Sería equivalente al CIN (Convective Inhibition) descrito por otros autores (Moncrieff y Miller 1976, Emanuel 1994), (Jenkins, 2004), (Potter, 2002), etc. El área A_2 representaría la energía que da lugar al fenómeno de convección, es el indicador de inestabilidad propiamente dicho y equivaldría a la CAPE (Convective Available Potential Energy) de la bibliografía. El IR se basa en la comparación de estas dos áreas pero para ello se necesitan una serie de consideraciones

previas: Conocer el Potencial de Montgomery, la energía estática húmeda y la energía estática húmeda saturante en un número suficiente de niveles de presión, y evaluar convenientemente las áreas A_1 y A_2 . El IR trató de englobar en un solo valor numérico la comparación entre ambas áreas. Así estimó como valor A_1 como la diferencia $h^*_{\text{CCL}} - h_{(850)}$ y como valor A_2 la diferencia $h^*_{\text{CCL}} - h^*_{(500)}$. Si IR es $A_2 - A_1$ entonces IR será $h_{(850)} - h^*_{(500)}$. Dicho índice alcanzó una alta significación con fenómenos propios de inestabilidad. Es de una ejecución muy similar a índice de Showalter y ligeramente mejor que el índice Total Totals.

Rivas Soriano et al (1994) realizan un análisis físico en profundidad de energía estática seca, húmeda y húmeda saturante que se utilizan por otros autores (Arakawa y Schubert 1974, Lord y Arakawa 1980) en diagramas termodinámicos como índices de inestabilidad, en el estudio de fenómenos convectivos, o incluso como base en índices de predicción de fuego que analizamos suficientemente en esta tesis. Rivas Soriano et al proponen una definición más general de la energía estática que pueda ser utilizada en procesos termodinámicos más realistas en la atmósfera. Y concluyen diciendo que las energías estáticas seca, húmeda y húmeda saturante, son parámetros de energía apropiados para ser utilizados en modelos atmosféricos termodinámicos, que pueden generalizarse en un nuevo parámetro que se define como (GSE Generalized Static Energy).

Potter (2002) en lo que concierne a la relación fuego-condiciones atmosféricas propone mejorar el conocimiento de la dinámica atmosférica desde un punto de vista físico. Basándose en herramientas y técnicas muy utilizadas en la física de la atmósfera propone una forma de estudiar operacionalmente desde un punto de vista físico. Define a partir de la CAPE otros índices termodinámicos como DE o PEPE que podrían ser útiles, tras una adecuada validación con datos de fuego que aseguren su funcionamiento. Toda su propuesta va encaminada hacia una reconsideración de muchos aspectos de la conducta del fuego que hasta entonces han sido utilizados en predicción y gestión de fuego. Él comenta que la situación es compleja y el estado del conocimiento científico no siempre coincide con las necesidades en operatividad.

Potter et al (2003) presenta diferentes índices que han sido utilizados para la determinación del peligro de fuego por parte de las agencias forestales. Entre ellos

muestra que han sido utilizados el *K Index* y el *Lifted Index*, sobre todo antes del surgimiento del índice de Haines (1988) de peligro de fuego en Estados Unidos, aunque inicialmente fueran definidos para la determinación de estabilidad atmosférica.

Una autora comienza a utilizar la CAPE como indicador del riesgo de fuego (Jenkins, 2004). La calculó según la teoría de la parcela, y halló que en situaciones de fuego cuanto mayor sea la CAPE mayores serán los ascensos que se producirán en la columna atmosférica. La severidad del fuego está directamente relacionada con el desarrollo de la columna vertical. Según Jenkins la CAPE puede ser alta tanto en situaciones de humedad como de sequedad, y es en esta última situación cuando cobra importancia el desarrollo del fuego.

Distintos índices de peligro de incendios

Fruto de la necesidad que las diferentes agencias forestales nacionales demandaban a mediados del siglo XX comenzaron a diseñarse índices de predicción del riesgo de fuego. Unos índices se basaron en las consideraciones según la perspectiva meteorológica y otros se basaron en fundamentos estadísticos o empíricos.

Según las conclusiones extraídas por Brotak (1977), el ya mencionado Haines (1988) elaboró un índice de tiempo de fuego que fue denominado LASI (Lower Atmosphere Severity Index) ahora llamado índice de Haines (HI). En el que se relaciona la estabilidad y la humedad de la columna atmosférica para definir la meteorología de mayor riesgo de incendios. Para ello estudió los radiosondeos a las 00:00 h en los días cuando acontecieron los 74 incendios más grandes de los Estados Unidos. Estableció 4 niveles de riesgo.

Haines fue el primero en construir un índice de tiempo de fuego basado en condiciones de estabilidad y humedad de la columna que indican la conducta extrema que el fuego puede tomar. Nosotros compartimos ese planteamiento inicial aunque discutimos aspectos formales que pueden mejorarse. Algunos de ellos también serán presentados aquí. Hubo otros estudios que mostraron las habilidades del modelo de Haines en la predicción de grandes incendios (Brotak 1993), pero existen otros que muestran situaciones donde el índice de Haines es vulnerable (Werth y Werth 1998). Es necesario entender como funciona el índice de Haines para poder saber su éxito o su fracaso en la operatividad. La mayoría de los trabajos intentaron correlacionar el índice de Haines

con la conducta severa del fuego pero no llegan a explicar el papel que desempeña, desde un punto de vista físico, tanto la humedad cerca de la superficie como la estabilidad atmosférica, en la aparición de la conducta extrema del fuego.

Potter (2001), Potter y Martin (2001) es el primero que intenta explicar el HI desde un punto de vista físico. Potter (2001) tras examinar el índice de Haines desde una perspectiva dinámica y energética, discute sobre la conveniencia de utilizar el estrato de mezcla, para calcular el índice de Haines, en lugar del estrato entre los niveles tipo de dicho modelo. Argumenta que, las influencias de la superficie pueden ser determinantes, en términos dinámicos, en el estrato considerado en el modelo de Haines, debido a las posibles interacciones que puedan existir. Sugiere una superposición entre el estrato de mezcla y el estrato utilizado por Haines, lo que puede reducir el valor del índice. El objetivo que plantea en su trabajo es encontrar la relación adecuada entre el estrato de mezcla y el estrato de Haines para obtener una predicción más útil del valor del índice.

Potter y Martín (2001) examinan la exactitud de las predicciones del HI para datos de 1999 y 2000 en Estados Unidos. Estadísticamente los resultados son similares para 24 y 48 horas. Ellos observaron que cuando las condiciones atmosféricas en invierno fueron de humedad y estabilidad el modelo las sobreestimó en la baja atmósfera. La situación inversa tuvo lugar en verano, en el que las condiciones de sequedad e inestabilidad fueron predichas por exceso.

Jenkins (2002) trató la existencia de un rango de estabilidad y de humedad importante en la conducta de fuego que se sitúa dentro de las situaciones de la clase de valor 6 de Haines de máxima severidad de fuego. Sugirió que el modelo de Haines debería ser redefinido teniendo en cuenta los parámetros de estabilidad y humedad cercanos a la superficie de una manera objetiva. Sus resultados muestran que para valores de HI de 6 sólo existirá una verdadera severidad de fuego cuando la humedad en superficie sea lo suficientemente baja y la inestabilidad lo suficientemente alta. Cuando el índice de Haines es de valor 5, o menor, la inestabilidad no es tan importante para el desarrollo del fuego incluso aunque la sequedad sea alta. También Jenkins (2004) trata de hallar si el índice de Haines posee alguna habilidad de predicción de riesgo de fuego, desde un punto de vista esencialmente físico, utilizando la teoría de la parcela para el estudio de la estabilidad y de la humedad en la columna vertical. Comenta que, en la conducta severa del fuego, la relación con el fuerte desarrollo convectivo y la baja humedad es muy directa. Jenkins (2004) incorpora sus resultados con el modelo de Haines y

concluye que el índice no discrimina entre una atmósfera con CAPE mayor o menor, o no determina si existe una inversión en altura, situaciones importantes para determinar la facilidad de ascenso de aire adiabáticamente. Propone una revisión del Índice de Haines que incorpore la evaluación de la estructura vertical de la atmósfera, no de una forma arbitraria, sino intentando representar las condiciones de estabilidad y humedad que pueden hallarse en la columna.

Tras el modelo de Haines en Estados Unidos se elaboraron dos sistemas de detección de peligro y de conducta. Los modelos americanos denominados NFDR, Índice nacional de detección del peligro de incendio, y el BAHAVE, sistema de comportamiento de fuego, son dos de los más conocidos a nivel mundial junto con el modelo de Canadá. El NFDR (National Fire Danger Rating System) (Deeming et al 1977) es un sistema muy complejo compuesto por multitud de índices y componentes hasta llegar a un índice final indicador del riesgo. Ninguno de ellos analiza el riesgo desde una perspectiva de la estructura de la columna atmosférica como hacía Haines. El BEHAVE al ser un modelo de conducta lo veremos más adelante.

Otro de los índices de riesgo de fuego coetáneo del sistema americano y que tiene en cuenta la importancia de los factores meteorológicos en superficie es el Índice Meteorológico Canadiense de Incendios Forestales (FWI) (Canadian Forestry Service 1984; Van Wagner 1987). Posee un carácter empírico e incorpora los efectos de la meteorología en los combustibles forestales y en la conducta del fuego. El FWI está basado en el efecto del contenido de humedad de tres tipos de combustible forestal, y del viento, en la conducta del fuego, constando de seis componentes. Este, al igual que el sistema americano, no evalúa el estado vertical de la atmósfera. Se trata de un índice que será analizado en profundidad en apartados de esta tesis.

El FFDM (Forest FIRE Danger Meter) (McArthur, 1967, 1996) es el sistema utilizado en Australia, y se encuentra fundamentado empíricamente en observaciones experimentales. Las variables de entrada en el sistema son: la temperatura máxima, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, estabilidad atmosférica, la duración del periodo de sequía y la cantidad de combustible. La salida son dos índices: Índice de Sequía e Índice de Peligro.

En Francia se elaboraron también métodos para la detección del riesgo de fuego. Así Orioux (1979) y Carrega (1987,1988) establecieron una serie de fórmulas estadísticas admitiendo que los principales factores de los que depende el riesgo son los meteorológicos. Son modelos de carácter esotérico sin ningún fundamento físico.

En Italia se adoptó un índice de riesgo de incendio basado en datos meteorológicos (Ventura et al. 2001). Fue elaborado según las indicaciones de una consulta técnica de la FAO/UNESCO del 1977 (Reifsnnyder 1977) para uniformizar un método de predicción del riesgo de fuego en el área mediterránea. El índice italiano se compone de dos subíndices: un Índice de Inicio y un Índice de Propagación. Depende de la temperatura máxima diaria, precipitación, temperatura media diaria, humedad relativa, velocidad del viento y número de días después de la última precipitación.

En España fue elaborado un modelo de detección del peligro de incendio vulgarmente denominado método ICONA (Vélez , 1982, 1988, 2000). Denominación adquirida por elaborarse en el seno del extinto Instituto de Conservación de la Naturaleza. Ahora desarrollado dentro de la Subdivisión General de Política Forestal del Ministerio de Medio Ambiente, es un sistema que consta de un índice de Probabilidad de Ignición y un Índice de Alerta que incluye el efecto del viento. Requiere de datos de entrada como temperatura, humedad relativa del aire, mes del año, orientación, pendiente, velocidad de viento y dirección del viento. Al igual que el americano y el canadiense nada tiene en cuenta la evaluación de la estructura vertical de la atmósfera.

Otra de las metodologías encontradas en la bibliografía para la detección del peligro es la teledetección. Caselles et al (1996) y Al-Rawi et al (2002) confían en la utilidad de técnicas de teledetección para monitorizar el riesgo de incendios ya sea por la obtención de la temperatura de la superficie terrestre o por el análisis de las condiciones de la vegetación. El utilizar el índice normalizado de vegetación (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) en la definición de riesgo de fuego asume el hecho que al disminuir la actividad vegetativa (NDVI bajos) el combustible es susceptible de ser quemado con más facilidad, y el riesgo es por lo tanto mayor.

Partiendo de la idea de que a menor contenido de humedad en el combustible vivo mayor riesgo de fuego, algunos autores coinciden en elaborar modelos que indiquen el riesgo de fuego basándose en la estimación por medio de métodos empíricos del contenido de humedad de la vegetación viva (Castro et al 2003). Consideran el contenido de humedad del combustible vivo como un índice de riesgo de fuego que puede introducirse en sistemas de detección de peligro de fuego. Concretamente Castro et al (2003) han centrado su estudio en la elaboración de dos modelos de determinación del contenido de humedad en una *cistácea* de clima mediterráneo a partir de variables meteorológicas y componentes del sistema de detección de riesgo de incendios canadiense. Afirman en su trabajo que existen especies *esclerófilas* y pinos que apenas

varían en su contenido de humedad a lo largo del año, pero existen arbustos como el *Cistus monspeliensis* cuyo contenido de humedad en sus ramas varía fuertemente siguiendo los cambios en las condiciones ambientales. Al establecer un modelo capaz de determinar ese contenido de humedad a lo largo del tiempo, a partir de variables meteorológicas, se está facilitando el conocimiento de su propensión a ser inflamado. El modelo construido empíricamente obtiene buenos resultados en el lugar de diseño. En definitiva, lo que vienen a decirnos es que las variables meteorológicas influyen en el contenido de humedad del combustible fino y, por lo tanto, en su facilidad de ignición. Potter et al (2003) indica que la mayoría de los índices de fuego que existen no han sido lo suficientemente validados, y se pusieron en funcionamiento antes de tiempo debido a las presiones de las agencias por adquirir rápidamente un índice que permitiera gestionar la lucha antifuego. Fruto de la insuficiencia en la validación los índices han resultado en su mayoría bastante acientíficos dando resultados erróneos, y pudiendo dar lugar a graves consecuencias en la gestión. El único índice que ha intentado validarse ha sido el de Haines, y se ha comprobado en su validación que no funciona igual en todos los lugares (Werth y Werth 1998). Potter indica que el problema es complejo y requiere un análisis científico en profundidad, así propone un procedimiento estándar de validación para los índices que se propongan, y puedan así universalizarse. La propuesta es considerar para la validación una base de datos diferente a la que se utilizó para construir el índice. El modelo GD cumple fielmente ese requisito como se insinuó en anteriores trabajos y como puede comprobarse de manera definitiva en esta tesis.

Modelos de conducta y propagación

Existe otra orientación que define modelos de riesgo de propagación de fuego y que trata el fenómeno, mediante la simulación, en función de las probabilidades de ignición de los árboles que conforman el bosque. Grassberger (1993) en este sentido analizó modelos (SOC, Self Organized Critical) de propagación de la literatura, que realizan simulaciones en dos dimensiones. Unas aproximaciones son simplistas y describen la propagación en frentes regulares. En otros escenarios de propagación (modelo de filtración) dependiente aleatoriamente de la densidad de árboles, los frentes serían espirales. Algunos modelos introducen la posibilidad de fuego espontáneo en un árbol por ejemplo a causa de un rayo. Anteriormente Von Niessen y Blumen (1986) y Ohtsuki y Keyes (1986) evaluaron la propagación de incendios considerando un aspecto dinámico, introduciendo el factor que puede ejercer el viento en los modelos de filtración. Albano (1994) presenta una modificación de las aproximaciones simplistas y

de filtración introduciendo la inmunidad de los árboles frente al fuego. Es la probabilidad de que un árbol no sea quemado por ninguno de sus vecinos. Los SOC tratan de simular las diferentes situaciones que pueden encontrarse en la naturaleza, pero sólo dan respuesta adecuada a algunos fenómenos de fuego. Tras muchos años de estudio en la formación de la estructura de este tipo de sistemas se han encontrado con una arrolladora variedad de complejas estructuras en la naturaleza. Loreto et al (1996) introdujeron un esquema de renormalización de este tipo de modelos SOC. Kearney (2002) examinó una versión modificada de modelo de filtración de propagación de incendios forestales; dicha modificación fue realizada en el condicionante de propagación del fuego a lo largo de los límites del bosque.

Otros modelos como el de Clark et al (1996) tratan de simular el comportamiento que tendrá un incendio partiendo de fundamentos exclusivamente físicos basados en ecuaciones de movimiento y termodinámica. La evolución del fuego, según ellos, dependen de las condiciones ambientales y de los procesos convectivos que el propio incendio genera, luego su propagación debe estudiarse con una base física. El modelo tridimensional que diseñan acopla la atmósfera y el fuego, evitando soluciones físicamente no realistas: *“En las ecuaciones de la relación del viento con la propagación deben tenerse en cuenta la retroalimentación y movimientos a microescala del fuego, ya que el propio incendio genera una inestabilidad del aire sobre él”*. *“El viento cercano al frente puede ser fuertemente modificado o puede ser producido por el mismo fuego”*. Tras realizar diversos experimentos reales, los resultados revelan una explicación dinámica para la línea de fuego y su geometría, demostrando que el modelo es una herramienta a tener en cuenta para tomar decisiones en la gestión meteorológica y de incendios.

Clark et al (1999) analizan la posibilidad de utilizar cámaras infrarrojas (IR) para detectar los movimientos, de orden de fracciones de segundo, que tienen lugar en la atmósfera a microescala durante un incendio, y que están directamente relacionados con los procesos de convección que influyen en la propagación del frente de fuego. Experimentalmente calcularon, mediante esta técnica, el flujo de calor vertical y velocidades verticales y horizontales del aire. Pudo estimar también vorticidades, alturas de la convección, etc. Los resultados muestran que esta técnica IR es capaz de detectar los movimientos a pequeña escala espacio-temporal que, según los autores, determinan la propagación y la conducta del fuego. Los problemas quizás estén en la visualización

de la cámara ya que la emisividad del foco es muy alta, y plantea la instalación de filtros que seleccionen la zona concreta de la combustión.

El BEHAVE, utilizado en USA y otros países, predice mediante una simulación cual será el comportamiento que seguirá el fuego una vez iniciado, y para ello, se basa en una interpretación física de la propagación por medio de ecuaciones matemáticas (Rothermel y Burgan 1984). El BEHAVE contiene también los modelos representativos de los diferentes combustibles que podemos encontrarnos en la naturaleza (Rothermel 1972, 1983) para establecer la conducta de un incendio.

Por otro lado Saastamoinen y Taipale (2000) modelizaron la propagación de un frente de fuego. Para ello correlacionaron la velocidad de propagación, la temperatura máxima en el sustrato, el flujo de viento, el contenido de humedad del combustible, el tamaño de la partícula y las propiedades de la madera. Algunas de las conclusiones más importantes fueron que: a mayor contenido de humedad menor velocidad de propagación, a mayor tamaño de la partícula mayor temperatura, la velocidad de propagación fue inversamente proporcional a la densidad y al calor específico del combustible, y a mayor flujo de aire más oxígeno pero las temperaturas decrecen.

Asensio y Ferragut (2002) desarrollaron una simulación numérica de la propagación de los incendios silvestres teniendo en cuenta la radiación y la convección (que representa el efecto del viento y la pendiente) como mecanismos de transferencia térmica. Reconocen una dificultad en la modelización debido a la diversidad y complejidad de combustibles y de factores que intervienen. Plasman que la combustión es un proceso natural, y por lo general, incontrolado por el proceso de retroalimentación que produce el calor desprendido en forma radiante, calentando otros combustibles para la ignición. Se trata de un modelo que no ha sido suficientemente validado con datos reales ni calibrados sus parámetros, paso indispensable para poner en funcionamiento cualquier modelo.

Este tipo de modelos son interesantes en el estudio de propagación de un incendio una vez iniciado, pero carecen de valor predictivo de aparición del fenómeno a priori. Quizás Clark et al (1996) se aproxime algo en lo que a influencia de las condiciones meteorológicas en el desarrollo del fuego se refiere, pero en general ninguno tiene nada que ver con la visión físico-atmosférica del fuego que nosotros planteamos de predicción de ocurrencia del fuego.

Relación de las condiciones meteorológicas con el área quemada.

Otra de las líneas de investigación fue dirigida hacia las condiciones meteorológicas que determinan el tamaño de los incendios. Flannigan y Van Wagner (1983), inicialmente, trataron la relación de los diferentes componentes del índice de tiempo de fuego del sistema de detección de peligro de incendio canadiense con el área quemada. Posteriormente Flannigan y Harrington (1988) realizaron un estudio, puramente estadístico, en el que trataron de relacionar también las áreas quemadas de diferentes provincias canadienses con variables meteorológicas utilizadas como entradas por el índice de riesgo de fuego FWI del sistema canadiense, tales como: la precipitación, la humedad relativa y la velocidad del viento. Hallaron que los días con baja precipitación o con bajos niveles de humedad relativa guardan una gran correlación con la superficie quemada. Afirman que una baja humedad relativa favorece la sequedad de los combustibles, y cuando esta aumenta, el contenido de humedad del combustible aumenta también, disminuyendo el riesgo de que se produzca un gran incendio ya que la propagación no se ve favorecida. Los resultados fueron muy similares a los obtenidos por Flannigan y Van Wagner (1983) con respecto a los componentes del índice canadiense. Algo esperable ya que dichas variables meteorológicas son el *input* de los componentes del FWI. A más precipitación, menos superficie quemada, y a mayor número de días secos en un mes y mayor número de días con baja humedad relativa, mayor superficie quemada. Estos resultados nos vienen a decir que largos periodos secos en el tiempo pasado pueden dar lugar a grandes incendios.

Delgado et al (1997) señalaron que justamente los días de grandes incendios solían ser los días en los que hay muchos incendios. Es decir, que las condiciones meteorológicas favorecedoras para que un gran incendio alcance gran tamaño deben ser las mismas que hacen que surjan un gran número de incendios.

Shoenberg et al. (2003) estudiaron desde un punto de vista estadístico la distribución del tamaño de los incendios acontecidos en el condado de Los Ángeles (California) en la segunda mitad del siglo XX (se trata de una base de datos muy rica en cuanto a números de incendios). Ellos concluyen que la distribución de los tamaños de los incendios no parecen cambiar con el tiempo en toda la serie de años, a excepción de una ligera tendencia a grandes incendios el final del siglo XX. Básicamente no existen indicios sustanciales de estacionalidad en la distribución del tamaño de los incendios. Es decir, los incendios siguen una cierta uniformidad en su tamaño según la evolución desde 1950 hasta 2000.

Causas de los incendios

Otra orientación del problema va encaminada hacia la investigación de las causas. Martell et al (1987) desarrollaron un procedimiento puramente estadístico para predecir la ocurrencia diaria de incendios por causas antrópicas en la región noroeste de Ontario (Canadá). Basándose en técnicas de análisis de regresión obtuvieron la probabilidad existente de que un fuego aparezca por causa del hombre. Este procedimiento funcionó bien en aquella región durante periodos relativamente húmedos.

La ocurrencia de incendios por causas antropogénicas está influida por algunos factores como el número de personas en el bosque, tiempo del pasado, condiciones de combustible forestal, actividad convectiva, etc. Las condiciones de humedad de los diferentes combustibles forestales son, según Martell, de mucha importancia en la ocurrencia del fuego por causa humana, aunque existen también otros factores relevantes que participan. Del total de combustibles inicialmente sólo fueron tenidos en cuenta los combustibles finos. Una de las afirmaciones según Martell et al (1987) es la siguiente: “ *sería razonable suponer que las condiciones de la vegetación forestal son relativamente homogéneas a lo largo del tiempo en todos los aspectos excepto en la humedad del combustible fino*” (dónde surge el fuego) “*que se puede ver muy influida por la variación del tiempo meteorológico de un día a otro*”. De dicha afirmación podemos deducir que la variación de la ocurrencia de fuego a escala diaria, sean cuales sean las causas que lo provocan, está directamente relacionada con la variación meteorológica a escala diaria. Pero en la ocurrencia de fuego también tiene su peso el tiempo meteorológico pasado expresado a través del contenido de humedad del resto de combustibles presentes en el bosque. Luego se está admitiendo que, independientemente del origen de las causas y su distribución estadística, para su efectividad, dependen de los condicionamientos atmosféricos tanto pasados como presentes.

Anteriormente, Cunningham y Martell (1973) habían mostrado que el número de incendios diarios causados por el hombre, en esa misma región de Canadá, eran dependientes del FPMC (Código de contenido de humedad del combustible fino) del sistema de estimación de peligro de incendio canadiense, pero no tuvieron en cuenta el resto de los códigos (referidos al contenido de humedad del resto de los combustibles disponibles). Más tarde ya en 1987 ya se contaría con todos los códigos del sistema canadiense de estimación de riesgo de incendio (CFFDRS) (Van Wagner 1974b) como variables independientes.

En esta materia Haines también trabajó utilizando técnicas de regresión para desarrollar relaciones entre la componente de ignición y factores influyentes en diferentes causas, incluyendo entre ellas la probabilidad de incendio por causa humana, o por rayos, en varias regiones de Estados Unidos. El sistema utilizado para ello en este caso fue el sistema nacional de estimación de peligro de incendio NFDRS.

Una de las causas potenciales de fuego también investigadas han sido las descargas por rayos. Rorig y Ferguson (2002) analizan cómo los rayos han sido importantes causas de incendios en USA, y muestra la necesidad de predecir las condiciones que pueden dar lugar a ellos. La inestabilidad, unida a la sequedad cerca de la superficie, son los ingredientes necesarios que dan lugar a que un rayo inicie un incendio. Índices de peligro de fuego, como el de Haines, y otros meteorológicos utilizados como el KI o el LI, distinguen bien la inestabilidad, pero no si una tormenta es seca o húmeda. Hay muchos factores que según Rorig deben tenerse en cuenta como, por ejemplo, que la precipitación se puede producir pero es posible que se evapore antes de llegar al suelo.

Gisborne (1931) tras observaciones de tormentas, rayos e incendios, estableció una relación causa-efecto. Los rayos han sido los responsables de más incendios que la combinación de otras causas en la región norte de las Montañas Rocosas en el periodo 1919-1928. Detectar con antelación suficiente las tormentas que causen incendios por rayo, permitirá responder más rápido para atacar la aparición de posibles focos por parte de los equipos de extinción. Observó dos tipos de tormentas diferentes, unas que daban lugar al inicio de muchos incendios y otras que no. Las tormentas que apenas traen precipitación llevan consigo mayor número de incendios, y son las llamadas tormentas secas. Constituyen un porcentaje bajo del total de tormentas acontecidas pero pueden ser de importancia en la aparición del fuego. Para la efectividad de la causa por rayo, a parte de la densidad de rayos por unidad de área que pueden alcanzar el suelo durante una tormenta, la ocurrencia de tormenta, etc, uno de los factores más importantes a tener en cuenta es si la tormenta es seca o húmeda. Ese factor, si es determinado meteorológicamente, puede ayudar a una gestión adecuada de los incendios causados por rayo, pero también incluso en aquellos cuya causa inicial de ignición no sea una descarga nube-tierra.

Rivas Soriano et al (2001a) analizaron la actividad de rayos nube tierra en la Península Ibérica entre 1992 y 1994 y observaron como la mayor concentración se localizó en los meses cálidos de Mayo a Septiembre. A una escala diaria los rayos tuvieron lugar en torno a las cinco de la tarde. Justo los momentos de mayor convección que puede dar

lugar a las tormentas, pero que también está comprobado, que es la hora en la que suelen aparecer los incendios.

Evapotranspiración

La evapotranspiración es la conjunción de dos procesos: evaporación y transpiración. Ambos acontecen en la parte baja de la atmósfera, en el lugar dónde se encuentran los combustibles forestales, y donde se desarrollan los incendios. Son dos procesos dependientes del contenido de humedad, tanto en el suelo como en el aire, como puede extraerse de algunos trabajos de investigación existentes:

Stewart y Broadbridge (1999) analizando un método para el cálculo de la humedad en la superficie del suelo durante la evaporación, describe este proceso que consta de dos fases. Una primera fase en la que la evaporación está gobernada por condiciones de la atmósfera como humedad relativa, temperatura del aire y velocidad del viento. En esta primera fase el suelo contiene humedad suficiente para satisfacer las demandas atmosféricas, y la difusividad de vapor de agua se mantiene. En una segunda fase el suelo está tan seco que la tasa de evaporación ya no se mantiene, y el transporte de agua en el suelo por capilaridad es el que va a determinar el proceso.

Russell y Hakan (1997) utilizaron el método propuesto por Brutsaert y Stricker (1979) para estimar la evapotranspiración a partir de datos meteorológicos. Tras reformular las ecuaciones de advección árida o poder desecante a partir del efecto del viento y el déficit de humedad, validaron dichas ecuaciones con datos de medidas de 43 días durante 4 meses en 1996, de un observatorio de NOAA en Colorado (USA). Los resultados de las estimaciones de la evapotranspiración, comparados con las medidas de evapotranspiración obtenidas por balance energético, fueron bastante significativas como para poder considerar este método, un buen método de estimación de la evapotranspiración.

Dado que son dos mecanismos por medio de los cuales el combustible pierde humedad van a ser determinantes en el riesgo de fuego. Un favorecimiento de estos procesos por parte de las condiciones atmosféricas acelerará la reducción de humedad en los materiales combustibles y, por lo tanto, un mayor riesgo de fuego, ya sean combustibles vivos (Castro et al 2003) o muertos (considerados según la mayoría de los índices de peligro de fuego como el canadiense o americano).

Castro et al (2006) reconoce la importancia de los procesos de pérdida de humedad en la vegetación viva por evapotranspiración durante los periodos de sequedad ambiental, y

plantea, una modelización del contenido de humedad del combustible fino vivo a partir de parámetros meteorológicos, como un buen método para indicar el riesgo de fuego. Con ello reconocen que los condicionantes atmosféricos son los influyentes en el estado de la vegetación y, por lo tanto, en el riesgo de fuego.

Existen modelos de predicción del tiempo, como es el caso del ECMWF, que son capaces de proporcionar información también sobre la humedad relativa que tendrá lugar. Concretamente la salida del ERA-40 del ECMWF da buenos resultados suficientemente validados (Betts et al 2006). Si no tenemos en cuenta los flujos de agua en el suelo, dado que procesos como la evapotranspiración dependen fuertemente de la humedad en la atmósfera cercana al suelo, y ésta se puede pronosticar por el ERA-40, de algún modo, puede predecirse así evapotranspiración, y por consiguiente, el contenido de humedad en combustible vegetal vivo y muerto.

Impactos de los incendios forestales

Otras investigaciones han ido encaminadas a el análisis de las consecuencias de los incendios forestales.

Se han estudiado por diversas técnicas las características, composición y cantidad de sustancias químicas emitidas durante un incendio. Por medio de técnicas de satélite han podido estudiarse el daño producido por los incendios en áreas como los bosques boreales de Rusia (Isaev et al. 2002), dónde mediante el uso del NDVI, se evalúa área quemada y una estimación de las emisiones de CO₂ que han sido emitidas. Correlaciona la variación del NDVI antes y después de un incendio con el nivel de daño forestal obteniendo buenos resultados, así proporciona algoritmos que relacionan ambos parámetros con la emisión de carbono a partir de datos de inventario forestal. Los algoritmos pueden ser útiles para la evaluación de emisiones no antropogénicas de CO₂. Otras técnicas de teledetección por satélite son utilizadas para evaluar los daños por fuego, y estimar la tasa de gases de efecto invernadero emitidos. Russel-Smith et al. (2003) presentan un prefacio sobre las contribuciones de una Conferencia Internacional celebrada en Darwin (Australia) en julio de 2002 codirigida por el *Tropical Savannas Cooperative Research Centre and Australian Research Council key Centre for Tropical Wildfire Management*. Fruto de dicha conferencia surgieron 17 publicaciones en el volumen 12 del Internacional *Journal of Wildland Fire*. En ellas se presentan diferentes avances en el conocimiento de los patrones de fuego, especialmente en sabanas tropicales del norte australiano, por medio de la aplicación de sensores remotos. La

biomasa global quemada puede asociarse a las emisiones de gases invernadero, por ejemplo, gracias a los avances en la sensibilización remota por satélite de la ocurrencia y extensión de los incendios, y la mejora en los conocimientos de la química atmosférica. Los 17 artículos presentados por Russel-Smith et al (2003) muestran aproximaciones, herramientas y técnicas (Sistemas de información Geográfica) por las cuales pueden estudiarse los regímenes de fuego a escala regional así como estimación de las emisiones en Australia y otras regiones del sudeste asiático.

Kato et al (2002) realizaron un estudio sobre la influencia de las emisiones producidas por los incendios en Siberia, en la concentración de contaminantes como el CO, en áreas alejadas del origen del fuego, concretamente en Japón. Tras medir las concentraciones de CO y O₃ durante 1998 en Happo (Japón) y realizar análisis de trayectorias de masas de aire concluyeron que los incendios de Siberia de 1998 se correlacionaron significativamente con aumentos de los contaminantes. Estos resultados sugieren que los contaminantes emitidos por los incendios pueden afectar a otras regiones fuera de su ámbito de acción, siempre que las circulaciones de masas de aire contribuyan a su transporte.

Los episodios de niebla causada por los incendios en el sudeste asiático en 1997 y 1998 han causado una preocupación entre los científicos. Estos eventos pueden durar varias semanas y afectar a diversos países. Se hace necesario por algunos investigadores aumentar el conocimiento de esta nube de humo, desde el punto de vista químico, y las posibles consecuencias. Radojevic (2003) identifica los diferentes compuestos químicos emitidos por los incendios forestales, y van desde gases de efecto invernadero, óxidos de nitrógeno y azufre causantes de la lluvia ácida, hasta compuestos orgánicos aromáticos de importancia en la salud humana. Pueden originarse también contaminantes secundarios fruto de reacciones fotoquímicas, tal es el caso del ozono, que pasa a integrar el denominado ozono troposférico. Son estudiados, en este sentido, en ese trabajo los episodios de incendios acontecidos en el sudeste asiático durante los años 90. Se analizan también en ese trabajo los diferentes procesos que se originan en un incendio denominados: ignición, llama, “smouldering” y extinción, y los diferentes compuestos químicos que resultan de cada uno. Los análisis sugieren que los óxidos se combinan con iones emitidos por los propios incendios y quedan neutralizados no produciéndose lluvia ácida. La publicación igualmente trata los impactos de los incendios en la meteorología y el clima, así, Radojevic presenta en su trabajo publicaciones donde aparecen los diferentes compuestos que se han hallado en

incendios acontecidos en multitud de lugares, y propone estudios de laboratorio y de campo que investiguen los mecanismos de transformación de los gases emitidos por un incendio.

Souhngen y Haynes (1997), por otra parte, desde un punto de vista económico evalúan el impacto de los incendios en el modelo económico del sector forestal en Estados Unidos. Determinan, además, si una reducción de los incendios aumentará el almacenamiento de carbono en el sumidero forestal. Con un modelo de mortalidad forestal posterior al fuego, confrontado a los inventarios forestales, obtienen las consecuencias económicas y la cantidad de carbono que se está almacenando en el sumidero. Su conclusión es que reduciéndose la ocurrencia de fuego puede incrementarse el reservorio de carbono así como los beneficios económicos en zonas de producción maderera. Los beneficios pueden ser ecológicos y económicos. Esto es importante para los legisladores para entender el papel de los bosques como sumidero y fuente de emisiones de carbono por medio de los incendios.

Uno de los impactos que podrían considerarse es la pérdida de diversidad a causa de los incendios. En Canadá se realizaron estudios que analizaron el impacto que podrían tener los incendios en la diversidad genética en especies forestales como la Picea negra (*Picea mariana*). Rajora y Pluhar (2003) tras relacionar genéticamente estándares de bosque de picea negra posteriores a fuego concluyó que los incendios forestales no afectan adversamente a la diversidad genética de esa especie.

Los incendios pueden tener un efecto de retroalimentación positiva con respecto al cambio climático, según Stocks et al (1998). Si los incendios van a incrementarse en los futuros escenarios de cambio climático, como ellos auguran en sus modelos, a su vez van a ser grandes fuentes de emisión de CO₂ que contribuirá a su vez a un cambio climático mayor. Dejarían de ser sumideros de carbono. Pero a nuestro juicio, habría que discutir si un escenario más cálido verdaderamente generará más incendios. Es reconocido por estos autores que los incendios son una importante fuente adicional de CO₂ a la atmósfera junto con los de efecto antrópico. Los bosques templados son probablemente junto con los boreales los que vayan a jugar un papel importante en el cambio global.

Con anterioridad Kasischke et al (1995) publicaron un trabajo semejante donde también presentan a los incendios como un proceso de retroalimentación del calentamiento global. Según ellos, si el calentamiento global tiene lugar, probablemente los incendios en las zonas boreales aumenten. Por medio de un modelo analizan la relación entre el

carbono almacenado en el suelo y en la biomasa. Si los incendios siguen aumentando las pérdidas de carbono netas en los bosques boreales serán entre 2.3 y 4.4 kg/m², y la liberación de carbono en los próximos 50-100 años será entre 0.33-0.8 Pg/año, influyendo a su vez en un incremento del calentamiento global.

Otros autores, como Fleming et al (2002), estudiaron a escala paisajística las interacciones entre los daños ocasionados por grandes incendios y por plagas de insectos, en áreas de bosques de piceas del centro de Canadá. La extensión real de las perturbaciones por insecto exceden ampliamente a la extensión de los incendios forestales. En un periodo de 3 a 9 años posterior a la acción de los insectos, en un área, aparecen los incendios ocupando entre un 4,8 % y un 7,5 % de esa área afectada, aunque este porcentaje depende de la región en que se encuentren. Expusieron que la perturbación por orugas de insectos abre una ventana de oportunidad para el fuego. En áreas dañadas por las orugas, el riesgo de fuego es mayor porque hay más combustible muerto disponible. Las zonas afectadas por la plaga fueron las más probables a ser quemadas. Si un cambio climático da lugar a un aumento de las áreas afectadas por el insecto, los incendios pueden aparecer con más probabilidad, y liberar más carbono a la atmósfera dando lugar a más efecto invernadero. Es según ellos también un proceso de retroalimentación positiva.

Dennis et al (2002) realizó una estimación de las emisiones producidas por incendios en el estado de Texas (USA) entre 1996 y 1997. Su estudio se basó en datos de inventario forestal, de superficie quemadas, y datos de la literatura como toneladas de biomasa por unidad de superficie y un factor de emisión de la cantidad de polutante por tonelada de biomasa quemada. Sus resultados arrojaron que, en volumen, con respecto al total de emisiones, las correspondientes a los incendios fueron en un porcentaje muy pequeño. La excepción fueron las partículas finas que llegaron a alcanzar altos niveles en la estimación. Estas partículas son respirables y pueden causar daños en los seres humanos.

Kauffman et al (1998), analizaron las consecuencias de fuegos prescritos para la creación de pastizales en tres áreas del Amazonas Brasileño, en cuanto a la biomasa y nutrientes perdidos. Los incendios que acontecieron en el final de la estación seca consumieron entre el 21 y el 84 % de la biomasa y hubo importantes pérdidas de C hacia la atmósfera, así como de N, S, P, K y Ca. Estas son mayores que las pérdidas que podrían realizarse por descomposición.

Bibliografía sobre el modelo GD

En un apartado de esta tesis, se presentan, los fundamentos físicos, la modelización y la validación del modelo GD desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo, siendo esta última, uno de los objetivos de esta tesis. Consideramos necesario por ello presentar cuál es la bibliografía publicada al respecto.

Este grupo de investigación comenzó su andadura en el estudio meteorológico de los incendios forestales a finales de los años 80 y principios de los 90. En una de sus primeras publicaciones al respecto, Labajo et al (1991) analizaron las características de la columna atmosférica que podrían ocasionar incendios (estabilidad y humedad) siguiendo una teoría similar a la presentada por Haines (1988). Quedaron allí establecidas las magnitudes energéticas de e (estabilidad) y D (déficit de saturación), (dependientes de parámetros de nivel como temperatura, geopotencial y humedad específica), y sus valores medios como parámetros umbrales para la modelización. El modelo funciona mediante el acoplamiento de e y D , y define así cuatro clases de día en base a los valores umbrales. Clase I inestable seca, clase II inestable húmeda. Clase III estable seca y clase IV estable húmeda. Con datos del número de incendios de Ávila, Cáceres y Salamanca (España), el número de incendios por día de cada clase fue mayor en las clases secas que en las húmedas y ligeramente mayor en la clase III que en la I.

García Díez et al (1993) realizan una serie de parametrizaciones en el cálculo de e y D , y tras compararlas con los parámetros del modelo de Haines (1988), aplica el modelo a Galicia (España) entre 1981-1985 utilizando los datos provenientes de la estación de radiosondeo de La Coruña (08001) a las 00:00 h. Estableciendo nuevos valores umbrales de e y D en 6 y 12 kJ/kg respectivamente. La metodología de acoplamiento de e y D en clases de día y el número de incendios registrados en Galicia da resultados en el DFR (número de incendios/ número de días) ordenando las clases según el riesgo de fuego: I, III, IV y II, de mayor a menor riesgo. También evalúa el porcentaje y la posibilidad de predecir los tipos de día de mayor riesgo. No obstante dejaron en el tintero cuestiones como la influencia de los días previos, y el análisis de la correlación entre el número de incendios y la diada (e , D) que dejaría para posteriores investigaciones.

García Díez et al (1994a) presentaron un modelo objetivo de predicción del número de incendios diarios basándose en las consideraciones físicas y parámetros presentados en otros trabajos anteriores. Hasta ahora habían desarrollado el método desde un punto de vista cualitativo de detección del tipo de día. En esta ocasión definen el denominado

“*Past Weather*” y “*Present Weather*”. El primero (PW) fundamentado en los incendios registrados en los días anteriores, como representativos de las condiciones meteorológicas, de suelo, y de vegetación del pasado. El segundo (W) en función del tipo de día definido a partir del análisis cualitativo; y posteriormente presentan las ecuaciones de predicción del número incendios. Para confirmar la calidad del método se utilizó la serie de datos Galicia 1986-1991. Los resultados fueron satisfactorios con alta significación entre predichos y registrados.

Similar trabajo fue realizado por García Díez et al (1994b) para el año 1992 en Galicia (España). Otros trabajos (García Díez et al 1995a, 1995b, 1995c, 1996a, 1996b, 1996c) validan el modelo para diferentes años en Galicia (España). En García Díez et al 1996c además se realiza un estudio estadístico para demostrar el carácter mesoescalar del modelo de predicción, siendo su distancia crítica con respecto a la estación de radiosondeo base (La Coruña 08001) de unos pocos cientos de kilómetros.

García Díez et al (1997) plantea una adecuada gestión de medios en la lucha antifuego dependiendo de la predicción cualitativa del modelo GD. El *Modus Operandi* variaría según la predicción en “*Máximo Despliegue*” de medios, “*Mínimo Despliegue*”, “*Medios Preparados*” o “*Despliegue Ordinario*”. Es decir, este modelo puede servir para la estrategia a seguir en un ámbito de gestión contra incendios.

García Díez et al (1999) valida el modelo hasta 1992, y presenta un análisis cualitativo y cuantitativo del modelo de predicción GD.

Delgado et al (1997) valida el modelo GD en Galicia hasta 1994 y deduce que los días con un alto número de incendios son precisamente los días que acontecen los de mayor tamaño, puesto que según ellos, las condiciones meteorológicas de aparición son las mismas que las de desarrollo.

Como hemos podido comprobar el modelo está lo suficientemente testado y puesto en conocimiento de la comunidad científica para su valoración. Ha sido suficientemente contrastado, siendo citado por autores importantes en el tema, como Potter (2002).

Trabajos de validación y análisis meteorológico del modelo GD iniciados con anterioridad (Simal, 2006) son presentados de forma definitiva en esta tesis junto con algunas consideraciones de mejora. Los últimos avances en la materia han sido presentados ante la comunidad científica en varias ocasiones en la celebración de Congresos, destacando la presencia con tres trabajos (Simal et al 2006b, 2006c y Domínguez et al 2006b) en la 5th International Conference on Forest Fire Research en Portugal (2006).

Modelos de predicción meteorológica

Para conocer el futuro estado de la atmósfera, a partir de un estado inicial de la misma, se utilizan los llamados modelos numéricos de predicción del tiempo. Durante el siglo XX fueron desarrollados modelos que realizan un pronóstico de la situación meteorológica a escala sinóptica con varios días vista. Estos modelos simulan el comportamiento de la atmósfera, y nos permiten conocer, de forma aproximada, el tiempo que nos vamos a encontrar en un instante dado en un área determinada. Aunque no fueron creados directamente para la Gestión de lucha antifuego, pueden ser utilizados para ella tras una adecuada interpretación subjetiva u objetiva de los datos de salida. El *output* de estos modelos muestran las situaciones a escala sinóptica que se prevén, y tras cuyo análisis subjetivo, es posible definir si existe riesgo o no de fuego en algunas regiones, ya que hay determinadas circulaciones propensas al fuego sobre todo en áreas costeras. También nos aportan datos objetivos de parámetros meteorológicos con buena resolución en las tres dimensiones espaciales. Especial interés tienen los parámetros de salida de la componente vertical de la atmósfera sobre un punto dado.

Thornton et al (1997) establecieron un modelo de predicción a escala temporal diaria de temperatura, precipitación, humedad y radiación para áreas de escala sinóptica a partir de datos de observaciones diarias de temperatura máxima, temperatura mínima, y precipitación de 500 estaciones en superficie. Se trata de un modelo validado en el noroeste de Estados Unidos, obteniendo buenos resultados en la predicción, y siendo de un 83,3 % de acierto para la precipitación. Este y otros modelos similares de escala diferente encontrados en la literatura pueden ser aplicados para investigaciones en la hidrología y en el medio ambiente, especialmente para estudiar la previsión de ocurrencia de los incendios forestales. Una buena predicción en el espacio y en el tiempo puede ser útil para implementar sus resultados en modelos objetivos de detección del riesgo de fuego, y hacer una proyección de futuro que permita adecuar la gestión de la lucha contra los incendios.

Los modelos de predicción numérica del tiempo poseen un plazo de predicción de varios días (en el caso de HIRLAM con salidas cada 6 horas) y proporcionan información meteorológica de los diferentes niveles tipo de la columna atmosférica en todos los puntos del espacio (los niveles más interesantes son 850, 700 y 500 hPa). Se fundamentan en una serie de datos iniciales de entrada de observaciones meteorológicas, provenientes de una amplia red de estaciones, para ser introducidos en

ecuaciones de predicción numérica. Un análisis de interpolación óptima tridimensional es el encargado de abarcar todos los puntos del espacio (malla). Tras una serie de parametrizaciones, el modelo genera una salida para un área definida, informando los parámetros en todos los puntos del grid.

Los modelos numéricos de predicción del tiempo se suelen clasificar en función de su escala espacial en:

- Globales (abarcan todo el globo terráqueo)
- Regionales (para un área limitada)
- Baja resolución (distancia horizontal entre puntos de rejilla de más de 100 kms.)
- Alta resolución (distancia horizontal entre puntos de rejilla entre 100 y 10 kms.)
- Mesoscala (distancia horizontal entre puntos de rejilla menor de 10 kms.)

Y en función de su escala temporal en:

- Climáticos (horizonte de predicción de años)
- Estacionales (horizonte de predicción de uno a seis meses)
- Medio plazo (horizonte de predicción de 3 a 10 días)
- Corto plazo (horizonte de predicción de 1 a 2 días)
- Muy corto plazo (de 3 a 24 horas)
- Predicción inmediata (*Nowcasting*)(minutos a 2 horas)

Existen diferentes escalas espaciotemporales en las cuales los fenómenos meteorológicos pueden ser estudiados. En función de cual sea el evento a estudiar se escogerá una escala u otra (Orlanski 1975 , Pielke 1984, Stull 1988 y Thunis y Bornstein 1996). Los incendios acontecen a escala meso, y hay determinadas situaciones a escala sinóptica que pueden determinar la aparición del fuego a escala meso. A la hora de analizar los incendios serán las dos escalas utilizadas: la escala meso y la sinóptica (que en el esquema anterior equivaldrían a escala de baja resolución y del corto plazo y a la escala regional del medio plazo respectivamente).

El modelo HIRLAM (High Resolution Limited Area Modelling) y el Modelo IFS (Integrated Forecast System) del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) son dos de los más conocidos en España pues son los dos que se encuentran disponibles en la web del Instituto Nacional de Meteorología (www.inm.es), ahora Agencia Estatal de Meteorología.

El modelo HIRLAM es un modelo regional (área limitada) de predicción numérica del tiempo que se encuentra operativo en el INM desde el mes de febrero de 1995. Es el resultado de un proyecto de cooperación entre varios países europeos (Finlandia, Suecia, Noruega, Dinamarca, Holanda, Irlanda, Islandia y España, más Francia como colaborador), para desarrollar modelos de predicción numérica del tiempo de corto plazo. Este modelo proporciona información meteorológica de temperaturas, humedad, viento, geopotencial, etc en los diferentes niveles de la columna atmosférica en todos los puntos de la malla.

Modelo IFS (Integrated Forecast System) del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) es el otro de los modelos utilizados por el INM. El Centro Europeo para Predicción a Medio Plazo es un organismo internacional financiado por los países europeos: Bélgica, Dinamarca, Alemania, España, Francia, Grecia, Irlanda, Italia, Holanda, Noruega, Austria, Portugal, Suiza, Finlandia, Suecia, Turquía y el Reino Unido. El acuerdo de creación de este organismo fue firmado en octubre de 1973. Mantiene acuerdos de cooperación con Croacia, República Checa, Islandia, Hungría y Eslovenia, así como con la WMO (World Meteorological Organization), EUMETSAT (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites) y con ACMAD (African Center of Meteorological Applications for Development). El modelo IFS proporciona predicciones hasta 10 días de las variables meteorológicas de hasta 91 niveles de la columna con una resolución de malla de 25 km.

Los modelos numéricos pueden ensamblarse de manera exitosa con el modelo GD de predicción de riesgo de fuego y de número de incendios.

La salida de modelos de ese tipo pueden servir de entrada a modelos objetivos de detección de riesgo de fuego. Con bastante buena resolución, pueden proporcionar información pronosticada para varios días de cada uno de los niveles de la columna en unas coordenadas del espacio dadas. La introducción de resultados de predicción numérica en las ecuaciones del modelo GD de detección del riesgo, contribuye a la determinación a priori del riesgo de fuego, así como del número de incendios que se registrarán. Los errores que puedan existir en las predicciones de los modelos numéricos pueden ser asimilados en el seno del modelo GD, existiendo un porcentaje de error muy bajo en la definición del riesgo del día, tal y como pudo comprobarse en proyectos anteriores realizados por este de grupo de investigación (Abedul 1996 y Álamo 1998).

Uno de los modelos más utilizados en Estados Unidos y de aplicación para la predicción del tiempo de fuego es el MM5 (Mesoscale Model 5). Se trata de la quinta versión de

modelos a mesoescala desarrollados por el Centro Nacional de Investigación de la Atmósfera de la Universidad de Pensilvania en Estados Unidos. Hoadley et al (2004), y otros autores anteriormente, tales como: Colle et al (1999) y Mass et al (2002), realizaron las validaciones pertinentes del modelo MM5. Hoadley et al (2004) evaluaron los parámetros de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y dirección del viento para distintas resoluciones espaciales, 36, 12 y 4 km . Esos parámetros son considerados en el NFDRS (sistema nacional de detección de peligro de fuego en USA) como factores determinantes del riesgo de fuego. La evaluación consistió en comparar los valores de salida del MM5 con los datos observados reales durante la estación de fuego de 2000 en el estado de Montana (USA). Obtuvieron resultados admisibles para poder utilizar el MM5 como modelo de predicción de condiciones de fuego. Los errores que pudieran existir en la temperatura o la humedad relativa son aceptables, la velocidad del viento en cambio es sobreestimada y podría dar resultados erróneos en la predicción de fuego.

Modelización del riesgo de fuego en escenarios futuros

Debido al creciente interés por el cambio climático y por los resultados emitidos por los diferentes informes del IPCC algunos autores ya citados como Stocks et al (1998) han elaborado una modelización del riesgo de fuego para escenarios futuros de emisiones de CO₂. En su trabajo utilizando cuatro importantes modelos de predicción de circulación general atmosférica, a partir de datos meteorológicos de estaciones canadienses y rusas, obtuvieron el promedio para dos escenarios de futuro diferentes. Con esos promedios aplicaron el modelo canadiense (Canadian Forestry Service 1984; Van Wagner 1987) y convirtieron el tiempo de fuego en (Van Wagner 1970a, 1970b) estacional y mensual para representar el riesgo de fuego existente en el futuro. Tras realizar una cartografía mediante sistemas de información geográfica los resultados les indican que el peligro será más alto en escenarios futuros en Canadá y Siberia. Todos los modelos y escenarios muestran un significativo incremento del área bajo un peligro extremo de fuego, de acuerdo con el FWI canadiense.

Gestión y toma de decisiones

La toma de decisiones en la lucha contra los incendios es otra de las líneas que se han desarrollado. Furman (1982) mostró la importancia que tiene la aportación de los gestores en la toma de decisiones tras aplicar un método de predicción, ya sea éste de

tipo climatológico, meteorológico o dirigido a la detección de incendios. Los índices de predicción meteorológica y de riesgo de incendios, se ha visto que pueden ser muy útiles en las labores de gestión, como es el caso de las medidas antifuego. Pero todos los modelos poseen limitaciones y situaciones dónde la predicción no es consistente. Lejos de tratar de mejorar, lo más conveniente en ocasiones, es permitir la aportación de una persona que interprete adecuadamente los resultados obtenidos por el modelo, y tome en consecuencia las decisiones que considere oportunas. Furman añade que muchos gestores creen que el único camino para aumentar la capacidad predictiva es mejorar la exactitud de las predicciones. Es cierto que eso aumentaría el valor de la predicción a la hora de tomar decisiones en la lucha antifuego, pero él comenta que el grado de incertidumbre al que han llegado los métodos de predicción es muy improbable que puedan ser mejorado a corto y medio plazo.

Furman propone otra forma de mejorar la probabilidad de acierto para la toma de decisiones y es aumentar la destreza de los gestores en la interpretación de los resultados de las predicciones. En su trabajo Furman muestra que decisiones basadas únicamente en predicciones, como son las propias de modelos de predicción de índices de riesgo de fuego, son a menudo menos correctas que si las decisiones están basadas en una combinación de ellas con los conocimientos sobre el fenómeno que el gestor, por su experiencia, puede aportar.

Furman demuestra que el valor de la información meteorológica en una decisión trascendente mejora mediante la aplicación de habilidades, por parte del gestor, en el uso de los datos y en la interpretación de los resultados.

Zhukovsky (1974) también concluyó que, la máxima efectividad en la toma de decisiones es posible, sólo cuando toda la información climatológica y de predicción es utilizada por el gestor. Es decir, que la capacidad de decisión del gestor es importante para mejorar el resultado de las predicciones.

Por otra parte recordemos que García Díez et al (1997) plantean una adecuada estrategia diferencial de gestión de medios en la lucha antifuego, dependiendo de la predicción cualitativa de su modelo GD (línea de investigación que ha sido desarrollada por autores como Simal (2006) y que aún sigue abierta).

CAPÍTULO I:

LEGISLACIÓN Y ÁMBITO DE GESTIÓN

Consideramos pertinente presentar aquí cual es la normativa en materia de incendios forestales, que ha estado y que se encuentra en vigor en el momento de la redacción de esta tesis, para diferentes ámbitos de aplicación.

La pertenencia del Estado Español a la Unión Europea le obliga a incorporar en su legislación nacional la normativa vigente en la Unión Europea en el caso de las Directivas, o a aplicar los Reglamentos y Decisiones que los estamentos comunitarios establezcan. Por ello, en primer lugar, vamos a presentar cuales son las normas que han aplicado y las que se encuentran en vigor en la Unión Europea hasta la fecha, y que son de obligado cumplimiento en materia de incendios forestales.

Posteriormente, se presenta la normativa Estatal en España y las normativas autonómicas en Castilla y León y Galicia por ser dos ejemplos paradigmáticos de Comunidades Autónomas españolas, y que han sido además objeto de estudio en esta tesis.

I.1. Legislación y gestión de ámbito comunitario

Serán considerados los diferentes reglamentos, decisiones, resoluciones, etc, del ordenamiento jurídico comunitario que han sido establecidas desde la inclusión de España en la Unión europea hasta el presente. Eso quiere decir que existen muchas normas que ya no se encuentran en vigor, pero han sido consideradas por plasmar la evolución que en materia legislativa ha sufrido el problema de los incendios a escala Comunitaria.

Poco después de la inclusión de España en la Unión Europea entró en vigor el **Reglamento (CEE) 3529/86 del Consejo de 17 de noviembre relativo a la protección de los bosques de la comunidad contra los incendios**. A causa de la cada vez más considerada conservación de los ecosistemas forestales en la Unión Europea, comienza a establecerse una acción comunitaria encaminada a la prevención y a la investigación de los incendios, con la participación financiera de la Comunidad en las medidas que se adopten al respecto.

El Reglamento (CEE) 1615/89 del Consejo de 29 de mayo, por el que se crea un sistema Europeo de Información y Comunicación Forestal (EFICS), con el fin de recopilar y hacer comparable los datos disponibles a escala comunitaria del sector forestal, establece un sistema que reúna, trate, analice y difunda dicha información. Una

primera fase del sistema entró en vigor el 1 de enero de 1989 y expiró el 31 de diciembre de 1992.

El Reglamento (CEE) 2158/92 del Consejo, de 23 de julio de 1992, relativo a la protección de los bosques comunitarios contra los incendios, tenía como objetivos la creación de un programa de datos comunitario sobre incendios forestales; disminuir el número de incendios y las superficies quemadas tomando una serie de medidas al respecto; clasificación por parte de los estados miembros de sus territorios en función del riesgo de incendio en alto, medio y bajo; elaboración de Programas de protección contra incendios; financiar parcialmente las medidas forestales a tomar; etc. Abarca 5 estados miembros donde se presenta riesgo de incendio: Alemania, España, Francia, Italia y Grecia.

La regulación de este sistema la realizará el Reglamento 804/94, que presentaremos en su momento, y que lo que viene a comunicar es, a cada estado miembro, un sistema de información sobre incendios que cumpla las especificaciones del 2158/92.

Este Reglamento 2158/92 expiró en 2002 ya que se trataba de un programa con 10 años de aplicación.

El Reglamento (CEE) nº 1170/93 de la Comisión de 13 de mayo de 1993 por el que se establecen determinadas disposiciones de aplicación del Reglamento (CEE) 2158/92 del Consejo en lo que respecta a los sistemas de información sobre incendios, presenta la forma de solicitud, solicitantes, requisitos, procedimientos y pagos de las ayudas para la realización de los programas y proyectos incluidos en el reglamento 2158/92.

El Reglamento (CE) 804/94 de la Comisión de 11 de abril de 1994 por el que se establecen disposiciones de aplicación del Reglamento (CEE) 2158/92 del Consejo en lo que respecta a los sistemas de información sobre incendios, indica que los estados miembros escogerán un conjunto de datos sobre incendios forestales que permitirán alcanzar los objetivos del reglamento 2158/92. Los datos comparables a escala comunitaria componen la llamada “Base Común de Informaciones sobre los Incendios Forestales”. Indica, además, dicho reglamento cuales son los datos concretos que deberán recogerse mientras estuvo en vigor el 2158/92. Decir que estos datos vienen a ser los especificados en las entradas de cualquier modelo de Parte de Incendios de los utilizados en España.

El Reglamento 308/97 del Consejo de 17 de febrero de 1997 por el que se modifica el Reglamento (CEE) 2158/92 relativo a la protección de los bosques comunitarios

contra los incendios, establece ampliaciones en la dotación presupuestaria para la ejecución de la segunda fase el programa planteado en el 2158/92 que se prolonga desde la finalización de su primer periodo el 31 de diciembre de 1996 hasta el 31 de diciembre de 2001.

El Reglamento (CE) núm. 1100/98 del Consejo de 25 de mayo de 1998 que modifica el reglamento (CEE) núm. 1615/89 del Consejo por el que se crea un sistema europeo de información y de comunicación forestal (EFICS), básicamente se encarga de ampliar el periodo en vigor del 1615/89, que había expirado, hasta el 31 de diciembre de 2002.

La Resolución del Consejo de 15 de diciembre de 1998 sobre una Estrategia Forestal de la Unión Europea, considerando la legislación forestal vigente en aquel momento en la Unión Europea, las propuestas del marco de la Agenda 2000 y las obligaciones asumidas por la UE en foros internacionales como la Conferencia de la ONU sobre Medio Ambiente y Desarrollo en Río de Janeiro en 1992, establece las bases para una Estrategia Forestal Comunitaria.

El Reglamento (CE) núm. 1727/1999 de la Comisión de 28 de julio de 1999 por el que se establecen determinadas disposiciones de aplicación del Reglamento (CEE) núm. 2158/92 del Consejo relativo a la protección de los bosques comunitarios contra los incendios, deroga el Reglamento 1170/93 y establece cómo los estados miembros deben elaborar sus programas nacionales anuales de protección contra los incendios, que tendrán una duración máxima de tres años. También se establecen directrices sobre la solicitud de las ayudas para la financiación de dichos programas.

La Decisión del Consejo de 9 de diciembre de 1999 por la que se crea un programa de acción comunitaria a favor de la Protección Civil (1999/847/CE), estará vigente hasta el 31 de diciembre de 2004, y su objetivo es la complementación de los esfuerzos de los estados miembros en los diferentes niveles para garantizar la protección de las personas, bienes y medio ambiente en caso de catástrofe. Donde están incluidos los incendios forestales.

El Reglamento (CE) núm. 1485/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de junio de 2001 por el que se modifica el Reglamento (CEE) en 2158/92 del Consejo relativo a la protección de los bosques comunitarios contra los incendios; Su principal finalidad es que, dado que expiró el primer periodo de aplicación del 2158/92 el 31 de diciembre de 1996, y que fue modificado por el reglamento 308/97, y dado que este último fue anulado en sentencia judicial, manteniéndose en vigor hasta

que se adopte un nuevo reglamento que lo sustituya, se crea este nuevo Reglamento 1485/2001 que garantice la seguridad jurídica de lo establecido en el anulado 308/97.

El Reglamento (CE) núm. 805/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de abril de 2002 por el que se modifica el reglamento (CEE) núm. 2158/92 del Consejo relativo a la protección de los bosques comunitarios contra los incendios, su objetivo básico es ampliar la duración del programa de 11 años desde enero de 1992, dado que expiró el 31 de diciembre de 2001. Quedando así ampliado un año más de lo que en un principio se había establecido en 1992.

El Reglamento (CEE) núm. 2152/2003 del Parlamento Europeo y del Consejo de 17 de noviembre de 2003 sobre el seguimiento de los bosques y de las interacciones medioambientales en la Comunidad (Forest Focus), se trata de uno de los más importantes Reglamentos ya que destaca la importancia de las masas forestales para el medio ambiente y el desarrollo rural. Expresa la necesidad de proteger el patrimonio forestal de forma sostenible, plantea una serie de objetivos, contenidos y definiciones, y establece un sistema de seguimiento, que en lo concerniente a los incendios, consiste en realizar un mantenimiento y aplicación de los sistemas desarrollados por el reglamento 2158/92. También estudia los aspectos que completen las medidas emprendidas por la Decisión 1999/847/CE y el Reglamento 1615/89.

El periodo de ejecución de este sistema se prolonga hasta el 31 de diciembre de 2006. Son presentadas en él las contribuciones financieras de la comunidad a los costes subvencionables de los programas forestales.

El Reglamento (CE) núm. 788/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de abril de 2004 por el que se modifica el Reglamento núm. 2236/95 del Consejo y los Reglamentos (CE) núm. 1655/2000, núm. 1382/2003 y el (CE) 2152/2003 a efectos de adoptar los importes de referencia para tener en cuenta la ampliación de la Unión Europea. En él se aumenta la dotación financiera para desarrollar dichos Reglamentos debido a la ampliación de la unión europea a 25.

El Reglamento (CE) núm. 2121/2004 de la Comisión de 13 de diciembre de 2004 que modifica al Reglamento (CE) núm. 2158/92 del Consejo, relativo a la protección de los bosques comunitarios contra los incendios, el Reglamento (CE) núm. 2278/1999, por el que se establecen determinadas disposiciones de ampliación del Reglamento (CEE) núm. 3528/86 del Consejo relativo a la protección de los bosques en la Comunidad contra la contaminación atmosférica; Presenta los requisitos que tienen que cumplir los organismos competentes designados por los

estados miembros para que se encarguen de la gestión de actividades de los programas, que pueden ser de carácter público o privado.

La Decisión del Consejo de 20 de diciembre de 2004 que modifica la Decisión 1999/847/CE por lo que respecta a la ampliación del programa de acción comunitaria en favor de la protección civil, con la finalidad del mantenimiento del marco de actuación comunitaria en el ámbito de la protección civil, se amplía a dos años el periodo de ejecución del programa de la Decisión 1999/847/CE hasta el 31 de diciembre de 2006.

El Reglamento (CE) núm. 1737/2006 de la Comisión de 7 de noviembre de 2006, por el que se establecen las disposiciones de ampliación del Reglamento (CE) núm. 2152/2003 del Parlamento Europeo y del Consejo sobre el seguimiento de los bosques y de las interacciones medioambientales en la Comunidad (Forest Focus). Dado que el citado reglamento 2152/2003 expiró el 31 de diciembre de 2006, se desarrolló este nuevo Reglamento 1737/2006 para establecer las disposiciones de aplicación de diversos artículos del 2152/2003 posteriormente al 31 de diciembre de 2006 y mantener así los diversos sistemas de información, los organismos competentes, proyectos, programas y gestión financiera en materia forestal en la Unión Europea. Este Reglamento entró en vigor el 3 de diciembre de 2006 y deroga los Reglamentos (CE) núm. 1696/87, (CE) núm. 804/94, (CE) núm. 1091/94, (CE) 1727/1999 y (CE) 2278/1999. Se trata del Reglamento que actualmente en el momento de la redacción de esta tesis se encuentra en vigor.

No debemos dejar en el tintero otro Reglamento de importancia en la aplicación de proyectos y programas en materia forestal y de incendios en la Unión Europea; es el referido al instrumento de financiación de los programas y sistemas establecidos en la legislación vigente: **Reglamento (CEE) núm. 614/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de mayo de 2007, relativo al instrumento financiero para el medio ambiente (LIFE+)**. Entre otros, que nos incumbe deroga, al Reglamento 2152/2003 y amplía los mecanismos de ayudas y subvenciones en materia medioambiental hasta el 2010.

Sujeto a esta normativa en el ámbito de la Unión Europea existe un programa denominado EUDIC, para el cálculo del riesgo de incendios forestales. La Red Europea de Protección Civil (PNNC-Permanent Network of National Correspondents for Civil protection), junto al CCR (Centro Comune di Rierca) o JCR (Joint Research Center), y

el departamento de Agronomía, Selvicultura y Ordenación del Territorio de la Universidad de Turín se encargan de desarrollar un sistema de alerta de incendios, para lo que requieren un conocimiento del riesgo de incendios existente en las diferentes áreas de la Unión Europea. Mediante el Programa EUDIC se cumple este requerimiento. Dicho Programa calcula los siguientes índices de Riesgo:

- Índice Portugués
- Método ICONA
- Riesgo numérico de Drouet-Sol
- Índice canadiense
- BEHAVE

Alguno de los cuales serán presentados en apartados de esta tesis.

La razón de que el EUDIC haya tomado índices ya existentes en la bibliografía para evaluar la alerta de incendios es para ahorrar tiempo y dinero de inversión en el desarrollo de un método propio por parte de los organismos gestores contra el fuego. La trayectoria de investigación que requiere la construcción y validación de un índice de peligro de fuego, como por ejemplo el canadiense, es muy larga y costosa.

Del conjunto de 6 índices que ofrece el EUDIC, hay que tener cuidado con la elección que se realiza para evaluar el peligro de incendio a nivel nacional o regional, porque va a depender de la zona en la que nos encontremos. Una mala elección puede no ajustarse a los condicionamientos de la región donde pretendemos aplicarlo porque no se encuentre validado en ella.

La Organización Meteorológica Mundial aconseja el uso de un único sistema a nivel nacional que facilite la comparación entre sus diferentes regiones.

En este sentido cobraría especial interés el desarrollo de un modelo universal que permitiera correlacionar resultados entre unas regiones y otras y esté validado espaciotemporalmente con bases de datos independientes a los que se utilizaron para su modelización. Todo apunta a que ninguno de los índices propuestos por EUDIC cumple dichos requisitos básicos en un índice de riesgo de incendios, como los planteados por Potter et al (2003), de ahí que sean calculados varios índices desarrollados inicialmente en regiones muy concretas, en vez de un único índice universal.

I.2. Legislación y gestión en el ámbito del Estado Español

La necesidad de crear un marco jurídico adecuado que regule las diferentes actividades que acontecen en materia forestal, donde se encuentran los incendios, es básico en materia medioambiental en cualquier estado. España dentro de la Unión Europea está sujeta a la reglamentación sobre incendios ya presentada con anterioridad, pero además requiere una adecuación de su legislación que garantice la consecución de los objetivos allí expuestos. Especial atención va a tener para nosotros toda aquella regulación referida a los incendios forestales.

El Estado español con la **Ley de Montes de 1957** introdujo una novedad importante en lo referente a los incendios, y no porque hasta aquel momento no se tuviera en cuenta la lucha contra el fuego, sino porque hasta entonces, no se había organizado y sistematizado por ley. En ella se adoptan medidas preventivas, combativas, reconstructivas y reparadoras, que se extienden a propiedades públicas o privadas. En el Capítulo III del Título IV de dicha ley, existen diversos artículos dedicados a la regulación de la defensa de los montes contra los incendios, que fueron derogados posteriormente por la Ley 81/1968 de 5 de diciembre de Incendios Forestales.

La Ley 81/1968 de 5 de diciembre de Incendios Forestales fue la primera ley desarrollada específicamente para regular el problema de los incendios forestales. Su finalidad básica era la prevención y la lucha contra los incendios forestales. Esta ley considera los incendios forestales como un problema de orden público, y establece las responsabilidades en las labores de extinción. Incluye también la adopción de medidas restauradoras de la riqueza forestal afectada. Establece una serie de medidas preventivas, la delimitación de zonas de peligro, medidas de extinción y responsabilidades, medidas reconstructivas, la creación de un fondo de compensación de incendios forestales, así como infracciones y sanciones. El reglamento que aprobó el funcionamiento de la Ley 81/1968, fue el **Reglamento 3769/1972, de 23 de diciembre**. Un Plan Básico de Lucha Contra Incendios Forestales llamado **Plan INFO-82**, y normas complementarias, fue aprobado por **Orden de 17 de junio de 1982**. Y se trató de la norma básica para la elaboración de los Planes correspondientes de riesgo de incendios forestales.

Relacionados con estos temas se elaboró diversa regulación como:

- **Ley 2/1985, de 21 de enero sobre Protección Civil**
- **Ley 7/1985, de 2 de abril, reguladora de las Bases de Régimen Local**

- **Real decreto 875/1988, de 29 de julio, por el que se regula la compensación de gastos derivados de la extinción de incendios forestales**
- **Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, por el que se aprueba la Norma Básica de protección Civil**
- **Orden de 2 de abril de 1993, por la que se dispone la Publicación del Consejo de Ministros de 18 de marzo de 1993, por el que se aprueba la Directriz Básica de Protección Civil de Emergencia por Incendios Forestales.**

Diez años después se elaboró la **Ley 43/2003 de 21 de noviembre de Montes**. Se trata de una ley muy completa que aborda ampliamente la problemática forestal en la que se encuentran englobados los incendios forestales. Después de la ley de Montes de 1957, ya obsoleta, era necesario que en el Estado español se legislaran las actividades forestales y se creara un aparato sancionador para que no quedaran impunes determinados delitos o negligencias que pudieran tener lugar, como el caso de los incendios forestales. Del mismo modo se hacía necesaria la elaboración de Planes y Programas en el seno de una estrategia forestal tal y como venía planteando la normativa comunitaria, y eso debe quedar suficientemente plasmado en el marco legislativo del Estado español. A continuación realizaremos una breve descripción de la ley en lo que se refiere a los incendios, que es el tema que nos atañe.

Esta ley se encuentra estructurada en siete Títulos con Capítulos conformando un total de 80 artículos. De los 80 artículos aproximadamente 15 son de especial interés en materia de incendios forestales.

Anteriormente al articulado de la ley, en la exposición de motivos, ya se hace una clara referencia a los incendios cuando la ley adjudica a la sociedad responsabilidades en la prevención, sensibilización, aviso y extinción de los incendios forestales; designa a las Administraciones Autonómicas competentes y responsables en materia forestal; exige coordinación entre las diferentes administraciones competentes en la lucha contra el fuego; propone que se designen las zonas de alto riesgo que deben tener una planificación propia; y plantea la reforestación de áreas quemadas.

En artículos iniciales de la ley (artículo 4) se presenta la importancia de los montes en la sociedad desde el punto de vista ecológico, como patrimonio natural del que todos nos beneficiamos, lo que hace a la administración pública veladora de dicho patrimonio debiéndolo conservar, proteger, restaurar, mejorar y ordenar.

Después aparecen una serie de definiciones de diversos conceptos entre los que nos encontramos con la definición de “monte” y la de “incendio forestal”. Una extensa definición de “monte” cargada de matices es presentada en el artículo 5 de la ley, que puede sintetizarse en: “ *todo terreno en el que vegetan especies forestales arbóreas, arbustivas o herbáceas, sean espontáneas o procedan de plantación*”. Pero si consultamos dicho artículo podemos ver que consideran también monte los terrenos yermos, por ejemplo. Una definición de enorme interés es la presentada, entre otras, en el artículo 6. Es la definición de “incendio forestal”: “ *fuego que se extiende sin control sobre combustibles forestales situados en el monte*”.

Algunos artículos posteriores son dedicados a las competencias de la Administración Pública, así en el artículo 7 hace referencia a las competencias del Estado en materia de medios de extinción contra el fuego. Dicho artículo plasma en su apartado c) como la administración General del Estado, en colaboración con las Comunidades Autónomas, y sin menoscabar sus competencias en este ámbito, tiene la función de normalizar los medios materiales en la extinción de los incendios en todo el territorio español, pudiendo desplegar medios estatales que apoyen a las Comunidades Autónomas, y puedan así éstas, completar las tareas en principio de su competencia.

Cuando la ley aborda la Información Estadística en materia forestal en el artículo 28, hace referencia explícita a la información sobre incendios forestales en el apartado f). Según dicho artículo los diferentes órganos competentes estatales y autonómicos deben elaborar dicha Estadística forestal entre la que se encuentran los incendios.

En otros artículos del Título III, concretamente dentro del Capítulo II se trata la Planificación forestal, aspecto ya mencionado en la legislación comunitaria. Dentro de la Gestión Forestal sostenible contemplada en esta ley, la Planificación Forestal cuenta con el establecimiento de:

- **Una Estrategia Forestal Española**, que debe contener: el estado de los montes y del sector forestal, previsiones futuras, así como los compromisos internacionales contraídos por España.
- **Un Plan Forestal Español**, cuyo papel es desarrollar la Estrategia y presenta la política forestal a seguir en el largo plazo (10 años).
- **Planes de Ordenación de los Recursos Forestales (PORF)** de elaboración autonómica, que incluyen las acciones y medidas a tomar para cumplir los objetivos prefijados en prevención y extinción de incendios.

Al hablar de la conservación y protección de los montes contra los incendios forestales (Título IV, Capítulo III, artículo 43) la ley hace clara alusión a la no exclusión de ningún monte de las responsabilidades competenciales de la administración. Las administraciones competentes deben adoptar las medidas de prevención, detección y extinción de incendios, independientemente de la titularidad de los montes.

El artículo 44 trata la prevención de incendios, y nombra aquí los programas de investigación de las causas y motivaciones de las mismas, los programas de concienciación y sensibilización, la regulación de actividades en el monte por parte de la administración autonómica, y la labor de las Fuerzas y Cuerpos de la Seguridad del Estado, etc, en la prevención, vigilancia disuasoria e investigación causal.

El artículo 45 advierte de la obligación de toda persona a avisar a la autoridad competente del inicio de un incendio; y los 46 y 47 incluyen la organización y los trabajos durante las medidas de extinción una vez iniciado un incendio.

Las Comunidades Autónomas deben declarar las zonas consideradas de alto riesgo dentro de sus territorios, tal y como dice el artículo 48. Dichas zonas deben de poseer un plan autonómico de defensa específico que las proteja, preferentemente, por ser áreas con una alta frecuencia de incendios.

El artículo 49 trata la cobertura de daños por incendios.

El artículo 50 exhorta a las Comunidades Autónomas a garantizar una correcta restauración de la vegetación post-fuego no pudiéndose cambiar el uso del suelo que existiera anteriormente al incendio.

Los artículos 67 y 68 tratan las infracciones y los delitos tipificados, entre los que se encuentran algunos con especial referencia a los incendios, como por ejemplo entre otros: d) *el delito de emplear el fuego en los montes o áreas colindantes en las condiciones, épocas, lugares no autorizados*.

El artículo 75 aborda las sanciones y el principio de proporcionalidad en función del delito cometido y las consecuencias. El grado de culpa y la intensidad del daño causado son dos de los aspectos que se consideran para el establecimiento de las sanciones, que en el caso de delitos relacionados con los incendios, son dos agravantes valorables muy comunes.

La **Ley 10/2006, de 28 de abril, por la que se modifica la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes**, vino a plantear modificaciones parciales y muy definidas en algunos de sus artículos debido a deficiencias e insuficiencias. De forma señalada se realizaron modificaciones en mecanismos de protección y conservación de montes en lo

que tiene que ver con la lucha contra los incendios. Esta nueva ley introdujo cambios importantes en el tratamiento jurídico contra los incendios. En dicha ley se afirma que los incendios tienen como causa, en la gran parte de los casos, la mano del hombre, ya sea por negligencia o por dolo, y esos delitos no pueden permitirse. Por lo que prohíbe el cambio de uso en el suelo forestal durante un plazo de 30 años, evitando así expectativas de recalificación futura. De esta forma el ordenamiento jurídico ordinario es compatible así con el Código Penal que ha adoptado la protección del medio ambiente en forma de tipificación de determinados delitos sobre el medio ambiente.

En el verano de 2005, posteriormente a un episodio virulento de fuego acontecido en Guadalajara con importantes pérdidas humanas, el Gobierno con carácter de urgencia elaboró en Consejo de Ministros el **Real Decreto-Ley 11/2005, de 22 de julio, por el que se aprueban medidas urgentes en materia de incendios forestales.**

En el comienzo del texto se hace especial referencia a la situación de sequía estival y a las altas temperaturas que se están registrando en España y se asocian directamente con un riesgo de fuego de *efectos devastadores* y que pueden desencadenarse *situaciones verdaderamente catastróficas*. Desde luego un lenguaje más que significativo por aparecer en el seno de una ley.

Algunos objetivos básicos de este Real Decreto-Ley, sin perjuicio de las medidas contempladas en la normativa autonómica, son :

- Recoger las medidas de apoyo: indemnizaciones, beneficios fiscales, etc
- Prohibiciones hasta el 1 de noviembre de encender fuego en espacios abiertos como medida preventiva.
- Prohibición de circulación de vehículos a motor, uso de maquinaria, etc, en las áreas que determina el artículo 5 de la Ley 43/2003 de Montes, como medida preventiva.
- Prohibición del tránsito de personas en las áreas que determina el artículo 48 de la Ley 43/2003 de Montes establecidas por las Comunidades Autónomas en un plazo de siete días, como medida preventiva.
- Medidas a tomar en infraestructuras de transporte y energía como medidas de prevención.
- Establece obligaciones para las administraciones locales.
- Medidas sobre el aprovechamiento de la biomasa forestal.

- Actuaciones de vigilancia y control que afectan al cuerpo del SEPRONA, tripulaciones de aeronaves, personal de vigilancia de apoyo a los establecidos por la autoridad competente; y una máxima dedicación de todos los cuerpos de vigilancia de todas las administraciones, las que deben de garantizar el cumplimiento de este Real Decreto-Ley.
- Reforzamiento de los medios aéreos estatales.
- Infracciones y sanciones.
- Coordinación entre administraciones en prevención y extinción.
- Establecimiento de dotaciones presupuestarias que hagan frente a las ayudas, créditos, etc.

Posteriormente a la entrada en vigor de este Real Decreto Ley entraron en vigor una serie de normativas a nivel estatal relacionadas con él:

- **Real Decreto 949/2005, de 29 de julio, por el que se aprueban medidas en relación con las adoptadas en el Real decreto Ley 11/2005, de 22 de julio, por el que se aprueban medidas urgentes en materia de incendios forestales.**
- **Resolución de 28 de julio de 2005, del Congreso de los Diputados, por el que se ordena la publicación del acuerdo de convalidación del Real Decreto-Ley 11/2005, de 22 de julio, por el que se aprueban medidas urgentes en materia de incendios forestales.**
- **Orden TAS/2859/2005, de 14 de septiembre, por el que se dictan normas para la ampliación de los dispuesto en el artículo 5 del Real Decreto-Ley 11/2005, de 22 de julio por el que se aprueban medidas urgentes en materia de incendios forestales.**
- **Orden APU/2872/2005, de 15 de septiembre, sobre procedimiento de concesión de subvenciones para reparar los daños causados por incendios forestales al amparo del Real Decreto-Ley 11/2005, de 22 de julio por el que se aprueban medidas urgentes en materia de incendios forestales.**
- **Real Decreto 1123/2005, de 26 de septiembre, por el que se declara, para incendios acaecidos en diversas Comunidades Autónomas, la aplicación de las disposiciones contenidas en el Real Decreto Ley 11/2005, de 22 de julio, por el que se aprueban medidas urgentes en materia de incendios forestales.**

- **Orden APA/1111/2006, de 7 de abril, por la que se dictan disposiciones para el desarrollo del real decreto 1123/2005 de 26 de septiembre, por el que se declara, para incendios acaecidos en diversas Comunidades Autónomas, la aplicación de las disposiciones contenidas en el Real Decreto Ley 11/2005, de 22 de julio, por el que se aprueban medidas urgentes en materia de incendios forestales.**
- **Real Decreto 609/2006, de 19 de mayo, por el que se declara, para incendios acaecidos en diversas Comunidades Autónomas, la aplicación de las disposiciones contenidas en el Real Decreto Ley 11/2005, de 22 de julio, por el que se aprueban medidas urgentes en materia de incendios forestales.**
- **Orden APA/2760/2006, de 6 de septiembre, por la que se dictan disposiciones para el desarrollo del real decreto 609/200 de 19 de mayo, por el que se declara, para incendios acaecidos en diversas Comunidades Autónomas, la aplicación de las disposiciones contenidas en el Real Decreto Ley 11/2005, de 22 de julio, por el que se aprueban medidas urgentes en materia de incendios forestales.**

Otro importante episodio de incendios acaecido en Galicia durante el mes de agosto de 2006, fue el que dio lugar al desarrollo del **Real Decreto-Ley 8/2006, de 28 de agosto, por el que se aprueban medidas urgentes en materia de incendios forestales en la Comunidad Autónoma de Galicia**. Su contenido aborda indemnizaciones, beneficios fiscales, ayudas, etc para los afectados por los incendios. Convendría destacar al inicio del texto el tratamiento que hace sobre la problemática del fuego: *“A pesar de la extraordinaria sequía que España padece por segundo año consecutivo, y de las altas temperaturas registradas desde el inicio del verano, durante los primeros siete meses del 2006, la evolución de los incendios había sido significativamente menos negativa que la registrada en 2005, e incluso respecto a los valores medios de la última década. Cabe suponer que dicho comportamiento ha sido resultado de la creciente concienciación ciudadana en esta materia, así como de los mayores esfuerzos, tanto normativos como inversores, realizados por las administraciones”.* Sin embargo dicha evolución se quebró en Galicia en pasado 4 de agosto, con una oleada de incendios que durante doce días ha afectado a esta Comunidad Autónoma y cuyos efectos han resultado especialmente devastadores a causa de las condiciones meteorológicas

reinantes”. Especial relevancia es que reconozca en su texto la existencia de una oleada de incendios y la consideración de las condiciones meteorológicas.

En relación con este Real Decreto 8/2006 la **Orden APA/1446/2007, de 16 de mayo** establece las bases para las convocatorias de ayudas tras los incendios acaecidos en Galicia.

En Canarias en julio y agosto de 2007 aconteció otro importante episodio de fuego que se consideró en la normativa mediante el **Real Decreto-Ley 7/2007, de 3 de agosto, por el que se aprueban medidas urgentes en materia de incendios forestales en la Comunidad Autónoma de Canarias**, de similares características al publicado anteriormente para Galicia.

Por otro lado, al margen de toda esta normativa, para la Comunidad Autónoma de Castilla y León es importante la **Resolución de 24 de octubre de 2006, del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, por la que se publica el Convenio de colaboración con la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León, para crear una unidad mixta de investigación, desarrollo e innovación forestales**, donde es considerado el campo de la investigación en la Prevención y Control de Incendios Forestales.

Esta es la legislación encontrada en el ámbito del Estado hasta el momento de la redacción de esta tesis, pero seguramente surgirá más reglamentación a lo largo del 2008 de similares características a la presentada aquí.

Al amparo de la presente normativa estatal, el Ministerio de Medio Ambiente, concretamente el Centro de Información Nacional sobre Incendios Forestales (CINIF), elabora diariamente un mapa con las zonas de mayor y de menor riesgo de incendios en España, diferenciadas por una gama de colores de menor a mayor riesgo desde el verde, amarillo, naranja, hasta llegar al rojo que es el de máximo riesgo. Con información INM (ahora AEM) sobre vientos, temperaturas, precipitaciones y estado de la vegetación, y considerando una serie de zonas homogéneas de riesgo de incendios forestales. Establecen los riesgos diarios para cada zona.

El estado de la vegetación es valorado por medio de teledetección evaluado los mapas de índice de vegetación de la Península Ibérica pero, a nuestro juicio, no es un método predictivo del riesgo de fuego, ni responde al comportamiento con el que el fuego aparece a escala diaria, tampoco ayuda mucho a la determinación en los incendios de invierno. Es un método de análisis de evolución de la actividad vegetativa pero aporta escasa información sobre el riesgo que acontecerá al día siguiente.

La información relativa a incendios en el territorio nacional es puesta en conocimiento de los ciudadanos a través de la web del Ministerio de Medio Ambiente, donde entre otros datos pueden consultarse recomendaciones preventivas que se hacen extensas a la ciudadanía.

Apoyándose en la información distribuida a diario por el CINIF durante la campaña de incendios, que la administración estatal la sitúa entre el 15 de junio y el 30 de octubre, la Dirección General de Protección Civil y Emergencias elabora dos veces al día un boletín donde se establece la distribución de los medios de extinción a fin de coordinar los medios competencia del Estado. Toda esta organización de medios se coordina con los pronósticos más detallados elaborados por las Comunidades Autónomas que son las portadoras de la mayoría de las competencias en la gestión antifuego.

En España ha sido desarrollado un sistema propio de Detección del Peligro de Fuego. Su elaboración comenzó en los años 50 y sus fundamentos básicos son semejantes a los sistemas canadiense, americano y australiano. El sistema español denominado *sintético modificado*, o vulgarmente conocido como *sistema del ICONA* determina, con parámetros meteorológicos en superficie, un índice de Probabilidad de Ignición y un Índice de Alerta a escala diaria, o un Índice de Severidad a escala estacional. Las limitaciones de este sistema son las mismas que se encuentran en el método canadiense y americano en el que se fundamenta.

El sistema español será presentado en esta tesis junto con el resto de índices de riesgo de fuego existentes a nivel mundial aunque existe bibliografía (Vélez 1982, 2000) dónde el sistema es ampliamente descrito.

Este modelo de detección del riesgo de fuego es el más extendido en la administración de estado para la adecuada gestión y ejecución de las medidas preventivas y de extinción.

En España se cuenta también a escala regional con un Índice de Frecuencia espacio-temporal, un Índice de Causalidad, ambos dos basados en consideraciones estadísticas; y un Índice de Combustibilidad basado en el sistema americano BEHAVE. Estos tres últimos índices son aglutinados en el llamado Grado Básico de Peligro o Riesgo Local. Cuando el Grado Básico de Peligro es alto y la Probabilidad de Ignición y el Índice de Alerta son elevados el riesgo de fuego es inminente.

I.3. Legislación y gestión de ámbito autonómico.

Las competencias en la gestión de los incendios forestales fueron trasferidas a las Comunidades Autónomas, que son las que deben elaborar y desarrollar los PORF (Planes de Ordenación de los Recursos Forestales), y los Planes de Protección Civil ante Emergencias por Incendios Forestales (en Castilla y León: INFOCAL) donde se incluyen las medidas preventivas y de extinción de incendios. Fruto de la adquisición de dichas competencias ha dado lugar a una reglamentación a escala autonómica. Nosotros aquí presentamos la normativa de la Comunidad Autónoma de Galicia y la de Castilla y León.

I.3.1. Normativa en Galicia

Dado que una de las Comunidades Autónomas objeto de estudio en esta tesis es la Gallega, hemos considerado positivo estudiar su reglamento jurídico en incendios forestales, y situarnos así en su contexto de gestión en la materia.

El ámbito legislativo hasta la trasferencia de competencias a las Comunidades Autónomas, en el que se sitúa la Comunidad de Galicia, es el de la conocida regulación estatal del:

- **Decreto 3769/1972 de 27 de diciembre, por el que se aprueba el reglamento de incendios forestales, que pone en funcionamiento la Ley 81/1968 de 5 de diciembre de Incendios Forestales.**

Con la trasferencia de competencias e incendios mediante el **Real Decreto 1535/1984 de 20 de junio que transfiere a la Comunidad Autónoma de Galicia las competencias en materia de conservación de la naturaleza**, la normativa que se establecerá será de ámbito exclusivamente autonómico.

Una de las primeras normas con aplicación en incendios en Galicia es el **Decreto 21/2005, de 20 de enero, de prevención de incendios y regulación de aprovechamientos forestales**. El objetivo del decreto es: *“compatibilizar y regular los aprovechamientos del monte con la finalidad de prevenir los incendios forestales y sus consecuencias”*. La definición de incendio que sigue este decreto es la misma que en la Ley 43/2003 de 21 de noviembre de montes.

Existen artículos dedicados a la regulación de las actividades permitidas sobre superficies ya quemadas. Entre ellos se podría destacar el artículo 5 referido a la

obtención de las autorizaciones para la construcción en terrenos rústicos quemados, que requieren, durante los tres años posteriores a la ocurrencia del incendio, un informe favorable de la Consellería de Medio Ambiente. Otras cuestiones tratadas en este Decreto son las medidas preventivas, limitaciones en ciertas actividades, así como la declaración de Zonas de Especial Riesgo (ZER). En este último caso las zonas declaradas necesitarán la adopción de medidas especiales de protección: en prevención, vigilancia o investigación. Los ayuntamientos donde se sitúen esas ZER serán prioritarios en las acciones sobre el resto del territorio.

Sobre las limitaciones además de las expuestas en el artículo 8, del uso de explosivos, existen las limitaciones específicas de las ZER en el artículo 10, algunas de ellas son: quema de rastrojos y restos de poda sin autorización de utilización del fuego y permiso de quema.

En el Decreto también se tratan los planes de defensa que elabora la Consellería de Medio Ambiente para cada una de las ZER. Los planes de defensa para las ZER incluyen los trabajos y medidas preventivas, la determinación de las épocas de mayor riesgo, las costumbres y actividades existentes que pueden manifestar provocación o negligencia de fuegos, la disponibilidad y financiación de medios de vigilancia y extinción, etc.

Este Decreto no olvida las infracciones y sanciones que ya se indican en la Ley 43/2003 de 21 de noviembre de montes de la legislación estatal en sus diferentes artículos 67, 68 y 74.

Al final de este Decreto, en sus anexos se presentan los modelos de solicitud para la autorización para el aprovechamiento de madera quemada, la autorización de pastoreo en terrenos forestales afectados por incendios y para la realización de actividades en terrenos quemados en los que su viabilidad esté directamente relacionada con la desaparición de arbolado.

Posteriormente se elaboró la **Resolución de 27 de enero de 2005 sobre medidas para la prevención de incendios forestales durante el año 2005**. Se trata de una resolución emitida para la aplicación en aquel año, en la que se regulan prohibiciones generales como medidas de prevención. También es definida la época de máximo riesgo, quedando situada entre el 15 de julio y 30 de septiembre de este año. Un dato a destacar en este sentido es el reconocimiento a considerar otras épocas de riesgo en otros periodos del año si las condiciones meteorológicas son de riesgo. En nuestra opinión es

un cierto reconocimiento de la existencia de la estación de fuego invernal que puede observarse en datos del número de incendios.

En la época de máximo peligro, esta resolución indica las prohibiciones expresas, como la de hacer fuego al aire libre en terrenos forestales. Otras consideraciones son: el régimen de autorizaciones de quemas, medidas preventivas de carácter general, las obligaciones de aviso y colaboración, y por último los trabajos de extinción.

Algunas medidas de prevención, según lo establecido en el Decreto 3769/1972 de 23 de diciembre, de carácter general, son mantener limpios de residuos y vegetación seca cunetas, carreteras, zonas de servidumbre, vías férreas y líneas eléctricas.

Las autorizaciones para quemas de residuos y quemas controladas, deberán solicitarse previamente en las oficinas del SDCIF (Servicio de Defensa Contra Incendios Forestales). En la autorización concedida se fija el día o días en los que se autoriza la quema. Esta resolución indica el procedimiento para llevar a cabo este tipo de quemas con seguridad.

Según las directrices del Decreto 21/2005, que trataban la declaración de ZER, la **Orden de 12 de julio de 2005 por la que se declaran las Zonas de Especial Riesgo de incendios forestales** recoge en un anexo cuales son estas ZER y en otro anexo el mapa de distribución en la Comunidad Autónoma Gallega. Para la determinación de las ZER se evalúa una serie de índices y parámetros como criterio entre los que se encuentran: los periodos de máximo riesgo de incendios, conflictividad, etc.

Recordemos la legislación estatal el Real Decreto-Ley 11/2005, porque para adaptar la Resolución de 27 de enero de 2005 a ella se elaboró la **Resolución de 12 de agosto de 2005** por la que se modifican las medidas para la prevención de incendios forestales establecidas en aquella resolución. Principalmente quedó modificado el apartado referido a las prohibiciones en la época de máximo peligro, y sin embargo el resto de las disposiciones de la resolución de 27 de enero de 2005 permanecieron aplicables. El cambio introducido más destacado es la incorporación de nuevas prohibiciones de hacer fuego en zonas recreativas, áreas de descanso; y sobre todo la inclusión de la prohibición de la circulación de vehículos a motor en las pistas forestales a excepción de los vehículos de las labores de gestión, entre otras adaptaciones de lo dispuesto en el Real Decreto-Ley 11/2005 y en la Ley 43/2003.

El Decreto 105/2006 de 22 de junio, por el que se regulan las medidas relativas a la prevención de los incendios forestales, la protección de los asentamientos en el

medio rural y la regulación de los aprovechamientos en repoblaciones forestales, se trata de una norma cuyos objetivos son: *“actuar en los montes y áreas colindantes mediante tratamientos afectados de biomasa residual, con objeto de llevar adelante una política preventiva contra los incendios forestales”.* *“Compatibilizar y regular los aprovechamientos y transformaciones del monte en zonas agrarias colindantes con la finalidad de evitar los incendios”.* *“Establecer las condiciones para la protección de los núcleos rurales respecto a los incendios forestales, en el marco de una política integral de desarrollo rural”.*

Con motivo de la ola de incendios que asolaron Galicia durante los días 4 a 14 de agosto de 2006 surgieron normas como el conocido Real Decreto Ley 8/2006 de la normativa estatal y el **Decreto 138/2006, de 24 de agosto, de medidas urgentes de ayuda para la reparación de daños y perjuicios causados por la ola de incendios que asolaron Galicia durante los días 4 y 14 de agosto del año en curso**. En el que se presenta el régimen de ayudas por los daños de ese episodio de fuego.

En el año 2007 fue desarrollada la **Ley 3/2007, de 9 de abril, de prevención y defensa contra los incendios forestales de Galicia**. Se trata de una ley específica para la lucha contra los incendios forestales que dota a Galicia de una nueva norma que permita establecer las medidas preventivas antifuego. La planificación preventiva pasa a ser un elemento estructural fundamental en el sistema. También uno de sus objetivos es integrar en el régimen jurídico la extinción, la protección de la población, las infraestructuras agrarias, etc. Destacaríamos el artículo 6 donde se establece el marco competencial de la Xunta de Galicia en la lucha contra los incendios. Una de las competencias es establecer las zonas de riesgo y las épocas de peligro de incendio. En el Título II trata la planificación en la defensa del espacio rural frente a los incendios definiendo las Zonas de Alto Riesgo (ZAR), en el título III las actuaciones preventivas, en el título IV las condiciones de circulación, acceso y permanencia en las áreas forestales y en el título V el uso del fuego queda regulado. Pero quizás uno de los títulos que más nos interesa en el VI en cuyo capítulo IV queda regulada la extinción e investigación de los incendios forestales. Esta ley establece también un régimen sancionador en su título VII.

En el cumplimiento de la Ley 3/2007 la **Orden de 18 de abril de 2007** se encarga de zonificar el territorio en función del riesgo de incendio forestal. En su anexo presenta las ZAR (Zonas de Alto Riesgo) en el territorio Gallego.

Otra legislación autonómica que puede ser de interés en incendios forestales es:

- **Ley 1/1995 de 2 de enero de Protección Ambiental de Galicia**
- **Ley 4/1997 de 25 de junio de caza de Galicia**
- **Ley 9/2002 de 30 de diciembre, de Ordenación Urbanística.**

Bajo este marco legislativo la Consellería de Desarrollo Rural de la Xunta de Galicia desarrolla diariamente un índice espaciotemporal de riesgo de incendio forestal para cada una de las épocas de peligro. Clasifica el riesgo en Bajo, moderado, alto, muy alto y extremo, representando un mapa de la Comunidad Autónoma dividido en sus diferentes Concellos. Cada Concello posee un valor del índice. Para el establecimiento de este índice de riesgo se tiene en cuenta la conjunción de los siguientes factores: la situación de la biomasa vegetal, el estado de las infraestructuras preventivas de las masas forestales y el estado del suelo.

Por otro lado realizan una zonificación de las ZAR. Son áreas donde se reconoce como prioritaria la aplicación de medidas más rigurosas en la defensa de los incendios. El criterio para establecer estas zonas es la especial frecuencia y virulencia con la que esos incendios aparecen estadísticamente en esas zonas, así como la existencia de valores amenazados. La información básica utilizada son datos históricos sobre la ocurrencia de incendios, vulnerabilidad de la población, amenazas de los ecosistemas, problemas de erosión del suelo etc. Las zonas no declaradas ZAR se consideran zonas de riesgo medio de incendio forestal.

La zonificación espacial establecida según el índice de riesgo diario y la zonificación de las ZAR, son los dos criterios establecidos para la gestión de los medios en la lucha antifuego en la comunidad autónoma de Galicia mediante el Plan INFOGA. El objetivo del INFOGA es establecer procedimientos de actuación, y organizar y coordinar los recursos y servicios disponibles para luchar contra los incendios dentro del territorio de Galicia.

I.3.2. Normativa en Castilla y León

Por fijar una fecha en el análisis de la legislación a cerca de los incendios forestales en Castilla y León, nos referiremos en primer lugar al **Decreto 63/1985, de 27 de junio, sobre prevención y extinción de incendios forestales**. En dicho decreto la Comunidad Autónoma asume las competencias en materia de conservación de la naturaleza y

comienza así la adecuación de sus normas reguladores para adaptarse a la nueva situación administrativa. Entre otras consideraciones en este decreto se establecen medidas preventivas mediante prohibiciones, limitaciones, autorizaciones, etc, así como aspectos relativos a la detección y extinción.

En la **Orden de 26 de junio de 1995, de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, por la que se establecen las normas básicas de actuación en el caso de incendio y las competencias y obligaciones de los técnicos de extinción**, queda fijado el procedimiento a seguir en caso de originarse un incendio y el reparto de la responsabilidades en la gestión. Destacaríamos aquí el establecimiento de una clasificación de los incendios en tres niveles en función de las masas forestales (artículo 4).

Orden de 5 de febrero de 1996, de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, por la que se regulan las autorizaciones para el aprovechamiento de los pastos afectados por los incendios forestales. En esta Orden se establece la necesidad de autorización para el pastoreo en terrenos afectados por un incendio. Sin una autorización expresa del Servicio Territorial de Medio Ambiente se entiende prohibido el pastoreo. El objetivo es favorecer la regeneración.

Decreto 105/1998, de 4 de junio, por el que se declaran “Zonas de Peligro” de Incendios Forestales. En cumplimiento de la Ley 81/1968 de ámbito estatal la Comunidad Autónoma de Castilla y León establece cuales son las Zonas de Peligro dentro de su territorio. También se establecen los derechos y deberes de los propietarios de terrenos dentro de estas zonas. En el anexo se ofrece una lista de los términos municipales.

Una de las normas más importantes dentro de la legislación autonómica en Castilla y León es el **Decreto 115/1999, de 3 de junio, por el que se aprueba la Estrategia Forestal de la Comunidad de Castilla y León**. En él, entre otros datos de interés destacaríamos la prácticamente equidad que existe en Castilla y León en el reparto de la titularidad de los terrenos forestales entre los públicos y privados. Un 45 % públicos y el resto privados. Los públicos la mayoría son propiedad de entidades locales y muy pocos estatales. El apartado 3 está dedicado a los incendios forestales, y en él se relaciona la regresión económica y humana de los municipios con el problema del fuego en la comunidad. Destaca León, Zamora y Salamanca como las que más incendios padecen y con mayor superficie. Son justamente tres provincias objeto de estudio en esta tesis para Castilla y León. Considera como un problema medioambiental

principal los incendiarios y la impotencia de los medios preventivos y de extinción. Para reducir el problema dicha estrategia plantea una serie de medidas en la planificación y gestión que: reduzcan el abandono de tierras, fomenten la concienciación, persigan a los incendiarios, aumento de medios humanos y materiales en la lucha contra el fuego, coordine los medios, establezcan ayudas, etc. Pero nada se ha encontrado sobre la inversión en la mejora de los sistemas de detección del riesgo de fuego.

En cumplimiento de la normativa de ámbito estatal, en 1999 también se aprobó el Plan de Protección Civil ante Emergencias por Incendios Forestales en Castilla y León mediante el **Decreto 274/1999, de 28 de Octubre**. Serían los inicios del conocido INFOCAL donde nos encontramos diversos apartados como: Fundamentos, Plan Director y Anexos. Dentro de su estructura se realizan análisis de riesgos, zonificaciones y épocas de peligro, clasificación de incendios forestales según su nivel de gravedad, operatividad, etc.

Existe una normativa que se encarga de la regulación de las actuaciones del personal de labores de extinción y prevención a fin de garantizar una mayor dedicación durante las épocas de mayor peligro. El **Decreto 178/2001, de 28 de junio, por el que se establece el sistema de guardias en las labores de lucha contra los incendios Forestales en Castilla y León para el periodo 2001-2003**, se encargó de regular dichas actuaciones durante el citado periodo. El Operativo Integral en principio, según cita el decreto, funcionará entre el 15 de julio y el 15 de septiembre. En el mes de mayo de cada año el número de guardias previsto debe ya establecerse según el riesgo potencial que ofrece la metodología seguida por el INFOCAL. El riesgo potencial y el número de guardias se establece anualmente, según este decreto, dada la variación que pueden sufrir los factores de cálculo de los índices de la metodología. Por ejemplo La **Orden MAM/669/2003, de 20 de mayo** determina el riesgo potencial y el número de guardias para el personal que ha de participar en el Operativo Integral de la Prevención y Extinción de Incendios Forestales en la campaña de verano 2003.

Posteriormente el **Decreto 89/2004, de 29 de julio** establece el operativo y regula el sistema de guardias. Y las órdenes: **Orden MAM/582/2005, de 25 de abril**, la **Orden MAM 760/2005, de 9 de junio**, y la **Orden MAM/1136/2006, de 30 de junio**, en cumplimiento de Decreto 89/2004, determinan anualmente el riesgo potencial y el número de guardias para el personal que ha de participar en el Operativo de Lucha contra los incendios Forestales de Castilla y León en las campañas de 2005 y 2006.

Otras órdenes relacionadas son las encargadas de fijar cada año la época de peligro estival de Incendios Forestales en la Comunidad de Castilla y León, y establecer las normas sobre la utilización del fuego. Aquí nos encontramos con la **Orden de 23 de julio de 2001, de la Consejería de medio Ambiente**, la **Orden de 21 de junio de 2002, de la Consejería de medio Ambiente**, y la **Orden MAM/743/2003 de 28 de mayo**. Las tres declaran la época de peligro en el periodo entre el 1 de julio y el 15 de octubre. Las tres regulan las actividades que no pueden realizarse durante la época de peligro como por ejemplo no quemar rastrojos. Pero por ejemplo la **Orden MAM/1147/2006, de 7 de julio** modificada más tarde por la **Orden /1110/2007, de 19 de junio** fija la época de peligro entre el 1 de julio y el 30 de septiembre, y se encuentra actualmente en vigor durante la escritura redacción de este trabajo. Como vemos ninguna establece una época invernal de incendios.

En otra línea para Castilla y León se elaboró la **Orden MAM/1062/2005, de 5 de agosto, por la que se declaran Zonas de Alto Riesgo de incendio en la Comunidad de Castilla y León y se establece el régimen de autorizaciones para el tránsito de personas y el ejercicio de actividades**, modificada posteriormente por la **Orden MAM/1111/2005 de 26 de agosto**. En ella se hace referencia al Real Decreto Ley 11/2005 de la normativa estatal, y establece de forma concreta las excepciones en las prohibiciones de tránsito de personas en los terrenos o Zonas de Alto Riesgo, y define lo que se entiende por actividades de gestión. También recoge la posibilidad de realizar actividades, en las zonas de peligro, que no hayan sido incluidas en las excepciones, siempre que se posea autorización de los Servicios Territoriales.

La Orden MAM/1062/2005 quedó derogada por otra posterior: **Orden MAM/1111/2007, de 19 de junio, por la que se declaran Zonas de Alto Riesgo de incendio en la Comunidad de Castilla y León**. Que se encuentra en vigor actualmente mientras se elabora esta tesis.

Otras normas autonómicas que podríamos destacar aquí son:

- **Decreto 55/2002, de 11 de abril, por el que se aprueba el Plan Forestal de Castilla y León**. Recoge la propuesta para la gestión del medio natural de Castilla y León durante los próximos 27 años. Consta de diversos programas verticales y otros tantos transversales. Por ejemplo, entre los primeros nos encontramos con el programa V5 de defensa del monte y entre los transversales por ejemplo el T4 de investigación.

- **Resolución de 14 de abril de 2002, de la Dirección General de Secretariado de la Junta y Relaciones Institucionales, por la que se ordena la publicación en el “Boletín Oficial de Castilla y León” el Convenio de Colaboración entre la Comunidad Autónoma de Galicia y La Comunidad Autónoma de Castilla y León, en materia de extinción de Incendios forestales.** Por medio de este Convenio quedan establecidas las condiciones para la colaboración en la prestación de servicios de extinción, seguridad y prevención de manera recíproca entre ambas Comunidades. La existencia de este convenio viene a corroborar la enorme relación que mantienen Galicia y Castilla y León en el problema del fuego. Cuando hay fuego en Galicia lo hay en Castilla y León.

Bajo este marco legislativo, el Plan de Protección Civil ante Emergencias por Incendios Forestales en Castilla y León (INFOCAL) es el encargado de realizar diversas funciones entre las que se encuentran:

- Un análisis del riesgo y vulnerabilidad de incendio.
- Una zonificación del territorio
- Establece las épocas de peligro
- Clasifica los incendios forestales según su nivel de gravedad
- Fija las competencias en la Extinción
- Marca la Operatividad
- Desarrolla las medidas preventivas

Del total de funciones desarrolladas por el INFOCAL consideramos destacar alguna de ellas de aplicación en el territorio de Castilla y León. La más importante en lo que concierne al objetivo de esta tesis es la primera de todas ellas.

Presentamos aquí la metodología establecida para la determinación del riesgo y la vulnerabilidad de incendio. En el análisis del riesgo el INFOCAL determina el conocido como Riesgo Local teniendo en cuenta la frecuencia, la causalidad y la peligrosidad. El Riesgo Local es calculado para cada término municipal.

El riesgo de incendio forestal se define como: *la probabilidad de que se produzca un incendio en una zona. Se estima a través de tres índices que reflejan la frecuencia de incendios, la peligrosidad de las causas y la peligrosidad de los combustibles*.

El **Índice de Frecuencia** se calcula con los promedios del número de incendios en un término municipal determinado.

$$F_i = \frac{1}{a} \sum_1^a n_i \quad (\text{I.3.2.1})$$

F_i : índice de frecuencia.

n_i : número de incendios cada año.

a : número de años.

Este índice se valora según la siguiente escala:

Tabla I.3.2.1. Escala del índice de frecuencia

F_i	VALORACIÓN
< 2	Muy Bajo
2-4	Bajo
4-7	Moderado
7-10	Alto
> 10	Muy Alto

Este índice tiene un sentido de prevención dado que el fuego presenta mayores frecuencias en unos lugares que en otros, pero a nuestro juicio, no tiene valor predictivo.

El **Índice de Causalidad** de incendios señala la tipología mas frecuente de causas de incendios forestales en la zona. Su cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$C_i = \frac{1}{a} \sum_1^a \frac{\sum_1^5 c n_{ic}}{n_i} \quad (\text{I.3.2.2})$$

C_i : índice de causalidad.

c : coeficiente de peligrosidad de cada causa.

n_{ic} : número de incendios por cada causa en cada año.

n_i : número total de incendios en cada año.

a : número de años.

Los valores de c son los siguientes :

Tabla I.3.2.2. valores de c en el índice de causalidad

TIPO DE CAUSA	C
Intencionado	10
Desconocido	7.5
Negligencia	5
Accidente	1
Rayo	1

La valoración del índice es la siguiente:

Tabla I.3.2.3. Escala del índice de causalidad

C _i	VALORACIÓN
< 2	Muy Bajo
2-4	Bajo
4-6	Moderado
6-8	Alto
8 - 10	Muy Alto

Los valores muy altos son indicativos de que la mayor parte de los incendios son intencionados. En nuestra opinión no tiene sentido predictivo. Puede tener importancia en la vigilancia y control, pero como le sucede al de frecuencia no se trata de un índice diferencial, todos los días poseen un mismo valor. Este índice junto con el de frecuencia pueden tener utilidad si se posee una buena predicción del riesgo de fuego en días sucesivos.

El **Índice de peligrosidad derivada del combustible forestal** trata de representar la importancia que la vegetación puede tener en el cálculo del riesgo. Tiene en cuenta tipos de combustibles según una clasificación de modelos de combustible (que es presentada en el apartado II.2 de esta tesis). La Fórmula de cálculo es :

$$E_i = \frac{1}{S} \sum_{e=1}^{13} eS_e \quad (\text{I.3.2.3})$$

E_i : índice de peligrosidad derivada del combustible forestal.

S : superficie total.

e : peligrosidad de cada modelo de combustible.

S_e : superficie ocupada por cada modelo de combustible.

Donde el valor de “e” viene definido por el modelo de combustible según la tabla:

Tabla I.3.2.4. valores de e en el índice de peligrosidad derivada del combustible forestal.

Número de Modelo de Combustible	e
1, 2 y 3	10
4, 5, 6 y 7	10
8, 9 y 10	5
11, 12, 13	1

El índice se valorará según:

Tabla I.3.2.5. Escala del índice de peligrosidad derivada del combustible forestal.

E_i	VALORACIÓN
0.1 - 1	Muy Bajo
1 - 3	Bajo
3 - 5	Moderado
5 - 7	Alto
7 - 10	Muy Alto

Este índice al basarse en los modelos de combustible, sólo tiene sentido si toda la superficie se encuentra en el mismo estado vegetativo como para ser identificado en la clave de modelos de combustible. Basta avanzar unos metros en el monte y el modelo puede haber cambiado. Además en este índice no se está teniendo en cuenta la orientación, proximidad a vías de comunicación, condiciones edáficas, etc que pueden determinar que el combustible sea más o menos propenso al fuego. Además no varía su valor de un día a otro por lo tanto todos los días se posee el mismo nivel de peligrosidad derivada de los combustibles.

Finalmente. El **índice de riesgo local o grado básico de peligro** utilizado en la metodología del INFOCAL integra el índice de frecuencia, el índice de causalidad y el índice de peligrosidad derivada de los combustibles forestales en una zona determinada:

$$RL_i = F_i C_i E_i \quad (I.3.2.4)$$

RL_i = índice de riesgo local.

F_i = índice de frecuencia.

C_i = índice de causalidad.

E_i = índice de peligrosidad derivada del combustible forestal.

El resultado final del RL_i se valorará según la siguiente escala :

Tabla I.3.2.6. Escala del índice de riesgo local.

RL _i	VALORACIÓN
< 1	Muy Bajo
1 - 25	Bajo
25 - 100	Moderado
100 - 300	Alto
> 300	Muy Alto

Puede parecer que el producto de tres índices constituye un índice global representativo, pero a nuestro juicio debemos realizar una serie de matizaciones sobre esta metodología. Tener en cuenta que valores bien distintos de los índices pueden dar el mismo resultado en el índice de riesgo local. El riesgo es el mismo según la metodología, pero la situación es muy distinta. A nuestro juicio los índices de riesgo no deben mezclar parámetros de naturaleza tan distinta.

La **vulnerabilidad** (V_i) es también otro de los parámetros calculados en la metodología de INFOCAL teniendo en cuenta el análisis de pérdidas y daños que, en caso de incendio, pueden afectar a: la vida de las personas, zonas habitadas, infraestructuras e instalaciones, valores económicos, valores ecológicos, valores paisajísticos, patrimonio histórico artístico, valores de protección contra la erosión del suelo. Se trata de un parámetro difícil de valorar diariamente.

El **riesgo Potencial** integra el índice de riesgo local y el de vulnerabilidad, resultante del sumatorio de ambos:

$$RP_i = RL_i + V_i \quad (I.3.2.5)$$

RP_i = Índice de Riesgo Potencial.

RL_i = Índice de Riesgo Local.

V_i = Índice de Vulnerabilidad.

Arrastra los defectos de todos los índices anteriores.

CAPÍTULO II:

DESCRIPCIONES CLÁSICAS

Como hemos señalado anteriormente, la concepción del fuego silvestre empezó siendo casi exclusivamente forestal. A tal efecto, el contexto paramétrico del problema se centraba principalmente en los procesos de evaporación y contenido de agua líquida en el suelo. Evidentemente, lo que podríamos denominar balance de humedad en el suelo juega un papel importante en cualquier superficie de cubierta vegetal, más allá de que sea un bosque de especies concretas.

II.1. Aspectos históricos.

Desde un punto de vista tradicional, se admite que el fuego es la resultante de la interacción ignición-combustible-comburente. Este es el denominado “triángulo de fuego”. El planteamiento es inicialmente correcto, aunque puede encerrar ciertas imprecisiones.

Si se entiende dicho triángulo como la conjunción de tres factores iniciales independientes y no condicionados por ningún agente externo a ellos, erraremos en la concepción del problema. Los tres, de forma más o menos directa, vienen a depender de las condiciones meteorológicas. En un caso (ignición), dependerán de condiciones presentes, en otro (combustible), de condiciones presentes y pasadas y, en cuanto al comburente, siempre lo será el oxígeno pero su presencia y renovación sobre la combustión depende, y mucho, de las condiciones meteorológicas del lugar. Ya desde el primer momento de la ignición el propio fuego genera un viento en superficie hacia el foco con el consiguiente acopio de oxígeno, y su intensidad dependerá fuertemente de la estructura atmosférica propia del lugar.

La tendencia en el número de incendios es en aumento en los últimos años. Teniendo en cuenta los vértices del citado triángulo de fuego, causas y combustible, nada indica que los incendios vayan a descender en los próximos años si dichos vértices del triángulo son cada vez de mayor magnitud. Por otra parte no se ha observado climáticamente que el vértice del comburente, directamente ligado con las condiciones meteorológicas favorecedoras, se haya incrementado frecuentemente. Por lo tanto el ascenso del número de incendios sólo puede atribuirse exclusivamente a una sociedad cada vez más desarrollada, que ha aumentado la cantidad de causas, y más pasiva con respecto al bosque, que ha aumentado el combustible disponible. Las razones del aumento de incendios no apuntan a variaciones de tipo climático. Frecuentemente las causas sólo se hacen efectivas sobre los combustibles cuando se dan las condiciones atmosféricas propicias para que el vértice del comburente llegue a valores elevados. Si y sólo si estas

condiciones aparecen el fuego hará acto de presencia, lo que sucede es que cuando lo hace, dentro de su variabilidad meteorológica usual, lo hace con gran virulencia debido a que la proporción de causas y combustibles es cada vez mayor.

Otro punto de vista tradicional es la descripción del fuego en términos de balance energético. Ahí aparece una primera fase endoenergética (calor de combustión) seguida de otra exoenergética. Pero también aquí debe entenderse que se trata de dos factores claramente influenciados por las condiciones meteorológicas. Fijado un tipo de vegetación, el calor de combustión depende exclusivamente de los condicionantes meteorológicos pasados y presentes, ya que éstos van a determinar su contenido de agua líquida (auténtica barrera endoenergética en la combustión). La energía inicial necesaria depende de la combustibilidad del material pero sobre todo en su mayor parte depende del contenido de agua líquida. Si el agua contenida en el combustible es elevada tendrá que aportarse una mayor energía de activación para llegar a la temperatura de ignición ya que previamente el agua debe evaporarse.

Por su parte, la posterior fase de exoenergía del fuego será más o menos efectiva para el desarrollo y propagación posterior, en función de los condicionantes meteorológicos. Sólo si estos condicionamientos lo permiten, otros combustibles adyacentes serán susceptibles del inicio de ignición y desencadenamiento de un incendio en progresión.

En relación al comportamiento del fuego una vez iniciado, tradicionalmente en la gestión es también analizada la llamada “Gran Triada”: compuesto por tres factores fundamentales: la topografía (relieve, la exposición y la pendiente), el combustible y la meteorología. La dependencia de la ignición del combustible de la meteorología ha quedado suficientemente justificada ya cuando hablamos del “Triángulo de fuego”. Y ningún comentario merece al respecto la mencionada meteorología propiamente dicha. La topografía con sus tres subfactores: El relieve, exposición y pendiente, sin dejar de ser factores importantes en la conducta de fuego, están sujetos a los condicionamientos atmosféricos. Ya sea una situación totalmente plana, o una situación con fuerte pendiente, tal y como hemos descrito los hechos, el fuego genera un desarrollo vertical que implica a su vez una circulación horizontal. El fuego progresará con mayor facilidad en aquellas situaciones meteorológicas donde se favorezcan las ascendencias y exista bajo contenido de humedad independientemente del tipo de topografía superficial.

Por tanto, incluso los esquemas más tradicionales convergen en el hecho diáfano que la meteorología del lugar es un auténtico regulador del fuego. Los parámetros atmosféricos

son a fin de cuentas los únicos capaces de detectar correctamente el riesgo de fuego, y los que pueden contribuir a una correcta gestión de la aparición del fenómeno en superficie.

Admitiendo la importancia de los condicionamientos meteorológicos en la actividad de fuego, en el ámbito de la gestión de lucha contra incendios, ha sido muy utilizado también tradicionalmente un criterio para indicar el máximo riesgo de fuego, basado en el análisis de tres parámetros atmosféricos de superficie: viento, humedad relativa y temperatura.

“Cuando la velocidad del viento supera los 30 km/h, la humedad relativa es menor del 30 % y la temperatura es mayor que 30 °C, el riesgo de incendios es alto”.

Es la llamada “Regla del 30” (Vélez 2000). Estas tres situaciones se encuentran íntimamente ligadas, a nuestro juicio, con los parámetros meteorológicos favorables al fuego, al igual que comentamos al hablar del “Triángulo del fuego”, la “Gran Triada” etc. Pero esta regla posee algunas carencias que convendría destacar. Desde un punto de vista meteorológico, por ejemplo, el riesgo puede ser alto incluso aunque la velocidad del viento sea menor a 30 km/h. Este criterio puede servir para detectar algunos días de riesgo, pero muchos días con riesgo pueden pasar desapercibidos por tener velocidad del viento menor de 30 km/h. Una baja humedad del aire es cierto que aumenta el riesgo de fuego. Pero el utilizar la humedad relativa como parámetro puede inducir a error por no reflejar el verdadero contenido de agua en el aire. Puede además suceder que ante humedades relativas superficiales mayores del 30 %, el día meteorológicamente sea de riesgo de fuego porque en realidad la sequedad sea alta en la columna atmosférica y, por lo tanto, este criterio de la regla del 30 no sea capaz de detectarlo.

Aparentemente puede pensarse que a más temperatura más riesgo de incendios y, por lo tanto, el criterio de los 30 °C ser factible. Ya comentaremos el efecto de las temperaturas en el riesgo de fuego, y como puede haber muchas situaciones meteorológicamente de riesgo alto (masas de aire frío que se sitúan en altura sobre la vertical de una región con no excesiva temperatura superficial) o riesgo bajo (altas temperaturas en superficie y sin embargo existir inversión térmica o superestabilidad) que la regla del 30 no es capaz de detectar.

La regla del 30 puede permitir detectar algunos días de alto riesgo, pero también detecta días en los que el fuego en realidad no se ve facilitado, al igual que deja sin

identificar otras muchas situaciones en las que sí hay verdaderamente riesgo. El utilizar esta regla puede incurrir en errores graves en la gestión.

Por lo tanto no solo se hace necesario estudiar la meteorología como único mecanismo regulador en el que convergen los sistemas tradicionales de la gestión, sino que debe hacerse de la forma correcta y analizando los parámetros adecuados. ¿Cuáles son estos parámetros? Son como podremos estudiar a lo largo de esta tesis: La estabilidad y la humedad atmosféricas.

Una visión muy arraigada en el contexto de la problemática del fuego, y en su relación con las condiciones ambientales, es que tradicionalmente se ha pensado que a mayor temperatura mayor riesgo de fuego. Podría admitirse que las altas temperaturas favorecen el fuego *per se*, pero una razonamiento más correcto es decir que las altas temperaturas inestabilizan la columna y esa disminución de la estabilidad es la que favorece el fuego.

La baja estabilidad atmosférica juega un papel fundamental en el aporte de oxígeno a la reacción de combustión. En determinadas condiciones atmosféricas se favorece que llegue comburente al foco de la primera ignición y que así se desarrolle un proceso en cadena que dé lugar a un incendio silvestre. La mayoría de los incendios comienzan en el intervalo horario 13-17 h, justo cuando la estabilidad atmosférica tiende a ser más baja por efecto del caldeo solar. Existen varias causas de inestabilización siendo el caldeo inferior una de ellas. Otro mecanismo de inestabilización es cuando se coloca por encima una masa de aire frío permaneciendo las temperaturas constantes en superficie, esa situación disminuye claramente la estabilidad. Como ejemplo más significativo de este segundo mecanismo descrito podemos resaltar el acontecido en Cataluña (España) en julio de 1994. En este caso no tiene por qué registrase elevación de temperaturas para la ocurrencia de fuego. Otro mecanismo de inestabilización puede ser también un incendio, cuyo efecto debe ser añadido a la situación que posea la columna en sí misma. En una situación totalmente plana e isotrópica un incendio genera una dinámica vertical que inicia una dinámica horizontal por el principio de conservación de la masa, y automáticamente aparecen un viento radial superficial al incendio. Si la estabilidad propia de la columna es baja esa dinámica vertical se verá favorecida y, por consiguiente, la horizontal, propagándose rápidamente el fuego sin dirección preferencial. Si la atmósfera no es isotrópica la propagación seguirá la dirección marcada por el viento de escala sinóptica mayor.

Si reflexionamos considerando un suelo en pendiente, la dinámica vertical del fuego va a tener una componente no nula sobre dicho suelo ladera arriba, y otra componente normal a la superficie del suelo. Como consecuencia el movimiento de propagación del fuego siempre tendrá un sentido ascendente. Dicha preferencia en la dirección desaparecerá al llegar a la cumbre. La dinámica vertical será mayor cuanto más fáciles sean las ascensiones en la columna, es decir ante la baja estabilidad. A más baja estabilidad, más dinámica vertical, mayor módulo tendrá la componente sobre el suelo con sentido ascendente, y mayor será la velocidad de propagación ladera arriba.

En pendiente y atmósfera no isotrópica podemos encontrarnos ante un régimen de brisas de ladera o ante un viento sinóptico dominante. Los regímenes de brisas de ladera favorecen las ascensiones de aire a lo largo de la ladera durante el día. Las descendencias ocurren durante la noche. Luego, durante el día, la componente de la dinámica vertical que corresponde al suelo se verá incrementada en módulo, siendo mayor, por lo tanto, la velocidad de propagación ladera arriba.

Si el viento sinóptico de fondo es dominante, la propagación en la ladera poseerá una componente de dicho viento. El relieve es cierto que juega en estos casos un papel fundamental en la direccionalidad, y en ese caso conviene definir las laderas de barlovento y las de sotavento, siendo las de barlovento las más proclives a una propagación del fuego al aumentar la componente de la dinámica vertical sobre la ladera. Si existen además valles, el viento por efecto desplome, circulará longitudinalmente a lo largo de él, y allí donde haya estrechamientos la velocidad será mayor. En ese caso existirá una componente horizontal dominante que puede influir en la propagación del fuego. En cualquier caso el fuego siempre progresará ladera arriba con mayor facilidad por la existencia de la componente vertical sobre el suelo, y más aun si la situación es de baja estabilidad atmosférica.

El otro de los parámetros atmosféricos es el contenido de vapor de agua que hay en la atmósfera, que junto con el viento en menor medida, van a condicionar el estado de la cubierta vegetal. El contenido de humedad, tanto del material muerto como del material vivo, va a disminuir en ambientes secos por medio de los procesos de evaporación y transpiración respectivamente. El hecho de que se reduzca el contenido de agua del combustible quiere decir que se necesita invertir menos energía para el cambio de estado de agua líquida a vapor, por lo tanto, hay más energía disponible para el proceso en cadena del incendio. Existe más energía inicial de activación para la combustión de los materiales adyacentes al punto de primera ignición. La sequedad debe ser

considerada como otro de los factores clave que influyen en el desarrollo del fuego. A nuestro juicio el hecho de que el combustible pertenezca a una u otra especie florística no influye en cuanto a combustibilidad específica, tanto como el contenido de humedad del material, y en dirección directa con él, la humedad atmosférica. Si la aparición de incendios dependiera de la diferente combustibilidad entre las especies que conforman la cubierta vegetal no se obtendrían los episodios que aparecen en las series de datos del número de incendios diarios. Tampoco se podría entonces justificar el sincronismo de actividad de fuego en áreas arboladas y no arboladas.

Otro de los factores meteorológicos valorados en la gestión, que mayor peso pueden ejercer en la aparición de los incendios, es la precipitación. Se trata de un parámetro que se encuentra muy íntimamente ligado con el contenido de humedad de la columna atmosférica. De tal manera que si se llega al punto de condensación y el contenido de humedad en el aire es suficiente, la precipitación se hace presente, y el riesgo de fuego se verá reducido. Un análisis de la humedad atmosférica en la columna es suficiente para englobar el efecto de la precipitación.

La ocurrencia de descargas por rayos nube-tierra es otro de los factores meteorológicos que pueden influir en la aparición de incendios pero su porcentaje como causa es muy bajo. Ellos están asociados a procesos convectivos fácilmente detectables en meteorología. Son situaciones con inestabilidad y humedad en altura. Especial interés tendrían aquí los días con inestabilidad y humedad en altura y sequedad en superficie, son las situaciones de tormenta seca, cuando los incendios por rayo pueden ser más frecuentes.

Todo apunta a que factores como los litológicos, edáficos, físico-químicos de los combustibles, bióticos de la vegetación, y sociales, no son determinantes en sí mismos en la aparición frecuencial del fenómeno del fuego. Bien es cierto que en algún momento pueden ejercer una activación o inhibición en el proceso pero su influencia es constante y la aparición o no del fuego queda supeditada a la variabilidad de los factores atmosféricos. Si otros factores aparte de los meteorológicos fueran más determinantes en la aparición del fuego, las series de datos de incendios no serían como las que han sido observadas por este grupo investigador en trabajos anteriores sobre el sincronismo de fuego en áreas regionales.

II.2. Características de los Combustibles.

Un elemento indispensable para que un incendio se produzca es la presencia de un combustible. En un principio un incendio puede originarse en cualquier tipo de combustible que sea capaz de dar lugar a un proceso de combustión, pero dado que los incendios silvestres suelen acontecer en formaciones boscosas se suele denominar a esos materiales potenciales de ignición, combustibles forestales. Cuando hablamos de combustibles forestales nos referimos a la materia vegetal viva y muerta, resultante del desarrollo vegetativo en una región determinada, que es susceptible de ser afectada por el fuego.

Los combustibles forestales van a poseer una serie de características físicas y químicas que van a influir en su facilidad para originar un fuego. Las principales características básicas del combustible forestal son:

- Cantidad
- Estructura
- Composición Química
- Humedad
- Poder Calorífico

Las características derivadas consecuencia de las anteriores son:

- Inflamabilidad
- Combustibilidad

Las características de los combustibles dependen de los condicionamientos atmosféricos. Cada área tiene una vegetación potencial propia acorde con sus condicionantes bioclimáticos como podremos estudiar en el apartado II.5. Cada formación produce un material vegetal vivo y a lo largo del tiempo se va acumulando un material vegetal muerto. Cualquiera de los dos tipos de materiales pueden verse afectados por un incendio aunque suele empezar en el muerto.

Algunas series de vegetación dan lugar a una mayor concentración de material, más cantidad de combustible disponible, y son en esas series en las que los incendios pueden alcanzar una mayor intensidad cuando sus características son las idóneas para el fuego. La composición química y poder calorífico de las especies dominantes en la serie no son, como ya hemos comentado a nuestro juicio, tan determinantes para la combustión y el desarrollo de un incendio, como lo es la humedad en el combustible directamente dependiente de las condiciones atmosféricas.

En el capítulo VI se muestran distintos criterios para la determinación del riesgo de fuego. Muchos de ellos basados en previsiones meteorológicas en el momento del incendio, y también en las características de las formaciones forestales. Pero las formaciones forestales dependen directamente de las condiciones a escala climática en la región. Podremos llegar a esa conclusión en el apartado II.5 tras analizar las formaciones vegetales en la Península Ibérica y más concretamente en la parte noroccidental. Cuando las condiciones climáticas dominantes son húmedas se da lugar a una formación forestal de gran desarrollo vegetativo (series de vegetación de la región bioclimática eurosiberiana de la Península Ibérica y series de vegetación húmedas y subhúmedas de la región mediterránea) que acumulan gran cantidad de material combustible vivo y muerto, disponible para el fuego. Son formaciones que abundan en áreas con cierta influencia marítima.

Las condiciones a escala meteorológica, de escala menor, lo común es que sean frecuentemente similares a las dominantes a escala climática, pero pueden estar en oposición durante un periodo determinado de tiempo, que suelen ser varios días. Cuando las condiciones climáticas dominantes en una región son húmedas, e irrumpen condiciones a escala meteorológica mesoescalar (de varios días) secas durante un periodo de tiempo, entonces se da lugar a una ruptura de condiciones. En áreas costeras del NW de la Península, estadísticamente tras la observación de bases de datos amplias de incendios, se ha visto que el fenómeno de fuego aparece justamente en esa situación. Valga como ejemplo el caso presentado en esta tesis, del periodo comprendido entre el día 14 y el 20 de marzo del 2005, en el que tuvo lugar en el norte de la Península Ibérica un importante episodio de incendios forestales.

Por todo ello, decir que el inicio y propagación del fuego depende más del tipo de combustible que de cualquier otro factor, es no explicar en su totalidad la razón de dependencia básica. Según nuestro punto de vista, bien demostrado en esta tesis, las condiciones atmosféricas en sí mismas, concretamente la humedad atmosférica y su influencia sobre el contenido de agua del combustible, son las que van a determinar el inicio y la facilidad de propagación del fuego. No olvidamos otros factores atmosféricos como la facilidad de aporte de oxígeno en la combustión que se podría materializar razonablemente con el parámetro de estabilidad atmosférica que estudiaremos en su momento.

Las características de los combustibles, dependientes de los condicionantes atmosféricos, que hacen posible la ignición, podrían concentrarse en la definición de dos parámetros: Inflamabilidad y combustibilidad.

La inflamabilidad se podría definir como la facilidad con la que arda un vegetal al ser expuesto a una radiación calorífica constante (Delabrazé y Valette 1977).

Si un combustible recibe calor (por radiación o por convección de gases calientes), aumentando su temperatura, si este calentamiento es continuo se produce una pirólisis que da lugar a una separación de hidrocarburos y vapores. Estos vapores en contacto con oxígeno pueden dar lugar a llama. La temperatura a la cual un combustible es capaz de emitir esos gases que provoquen llama se conoce como punto de inflamación. El proceso de inflamación es, por lo tanto, endoenergético y requiere en todo momento un aporte de energía calorífica de un foco externo.

El calor necesario para que un combustible aumente su temperatura hasta el punto de inflamación desde la temperatura inicial existente en el entorno tiene varias componentes:

- Calor absorbido por el agua contenida en el combustible hasta los 100° C.
- Calor de vaporización del agua.
- Calor de calentamiento de la materia seca.

Cuando el combustible se calienta lo primero que se evapora es el agua contenida pero antes tiene que calentarse el agua hasta el punto de evaporación, dicho de otro modo: al calentarse el combustible primero se calienta el agua que contiene, luego se evapora dicho agua, y posteriormente se calienta la materia seca hasta que se desprenden los gases provocando la llama. Si la temperatura de inflamación es baja se producirá antes la llama que si la temperatura es alta.

El proceso de evaporación es sin duda el paso más importante de todos porque debido a que el calor específico del agua es alto, se consume mucha energía en la evaporación, por lo que la temperatura del material sube muy lentamente hasta que todo el agua es desprendida en forma de vapor. Se invierte gran cantidad de calor en evaporar el agua de la materia vegetal. Por esa razón se utiliza el aporte de agua al combustible para sofocar incendios. Si el contenido de humedad es muy elevado la combustión no puede producirse. La reducción o aumento del contenido de humedad del combustible, sobre todo del fino que es donde aparecen los incendios, depende muy directamente de las

condiciones meteorológicas del momento. Si las condiciones no favorecen la evaporación jamás se llegará a la inflamación del combustible.

La composición química del combustible es otro de los factores que rigen la inflamabilidad en cuando a la mayor o menor riqueza de gases inflamables que contenga el combustible. Si es un combustible con una composición rica en gases inflamables la temperatura necesaria para liberarlos será menor y la llama aparecerá antes que si el combustible no posee tanta riqueza. Pero en cualquier caso, nunca serán desprendidos si previamente no tiene lugar una pérdida de la humedad contenida en el material.

Otro de los factores es la conformación del combustible, esto puede resultar lógico, ya que cuanto mayor sea la superficie de contacto del combustible con el aire mayor será en contenido de agua que pueda perderse por evaporación, y más fácil se puede alcanzar el punto de inflamación.

La humedad el combustible es considerado el factor más significativo en el proceso de inflamación. Hasta que este no desciende a los niveles mínimos no se da lugar a la posibilidad de llegar al punto de inflamación. La humedad en los combustibles es variable con el tiempo y depende de los procesos de evaporación y transpiración así como la capacidad de absorción radicular. Si la evaporación y la transpiración se ven favorecidas entonces existe un déficit de agua en el combustible, pero si se ven perjudicadas existirá superávit. Estos procesos de pérdida de humedad del material vegetal se ven facilitados por determinadas condiciones meteorológicas. El contenido de humedad en los combustibles depende definitivamente de factores ambientales influyentes en el contenido de agua de las plantas como la humedad del aire, viento, etc. Estas condiciones meteorológicas afectan tanto al combustible muerto como al vivo (Castro 2002, 2003, 2006), siendo a su vez más sensibles a estas variaciones meteorológicas los combustibles más finos.

La combustibilidad es otro de los parámetros que engloba características de los combustibles. Se puede definir como la mayor o menor facilidad a la que arde un vegetal, desprendiendo la energía suficiente para consumirse y provocar la inflamación de la vegetación vecina (Delabrazé y Valette 1977).

En el momento que se llega a la temperatura de inflamación, formándose la llama, el proceso deja de ser endoenergético para ser exoenergético. La producción de llamas, es decir, el emisión de gases inflamables y su reacción de oxidación con el oxígeno del aire, tiene lugar simultáneamente con el desprendimiento de energía en forma luminosa

y calorífica. Hablamos de combustibilidad cuando el calor desprendido en el proceso de inflamación es suficiente para mantener la reacción de combustión y propagarla a la materia vegetal próximo.

Al pasar el proceso de combustión de endotérmico a exotérmico, los materiales vegetales se convierten en un nuevo foco calorífico que puede iniciar la ignición de otras partículas contiguas.

Existen varios mecanismos por medio de los cuales el calor puede ser transmitido:

- **Conducción:** El calor se transmite entre los sólidos por contacto. Es un mecanismo poco eficiente ya que la materia vegetal transmite muy mal el calor por su baja conductividad térmica, además de que es necesario que el contacto entre el material disponible sea perfecto, lo cual sucede cuando la relación superficie /volumen es alta.
- **Radiación:** El calor se transmite con ondas electromagnéticas a través del aire. Es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el foco radiante y receptor, por ello es fundamental la continuidad de los combustibles.
- **Convección:** Es el mecanismo que contribuye, según la bibliografía, más eficazmente a la transmisión del calor. Es un transporte de calor por el aire. El aire contiguo al foco emisor recibe el calor, al calentarse disminuye su densidad y asciende, al contacto con los materiales que están a más altura el aire cede ese calor. La convección convierte a los combustibles del estrato arbustivo y arbóreo en disponibles. Es responsable de que muchos incendios de superficie pasen a ser incendios de copas.

Por el principio de conservación de la masa el aire caliente al ascender deja un vacío que es llenado con aire fresco realimentando con oxígeno el foco calorífico. Aquí juega un papel fundamental el fenómeno de la estabilidad atmosférica existente. Si la columna es poco estable esos movimientos se verán más favorecidos que en una atmósfera estable. Una vez iniciado el fuego localmente el propio incendio inestabiliza la columna por efecto de la convección. La estabilidad es un factor meteorológico importante en los mecanismos de transmisión de calor por convección en un incendio, tanto en los inicios como en su posterior desarrollo. Juega un papel fundamental en el aporte de oxígeno al foco del incendio y en la propagación de la combustión desde materiales del suelo hacia las copas.

Un parámetro inédito desarrollado en esta tesis es el nivel básico de penetración vertical, nos indica la facilidad de propagación vertical convectiva del fuego, de la altura que pueden alcanzar los gases de combustión, y por lo tanto de la altura de las llamas.

Como hemos podido concluir tras estudiar las características de los combustibles, el contenido de humedad del combustible y la estabilidad son decisivos para la inflamabilidad y la combustibilidad. Como se ha dicho, mientras hay agua en el combustible la reacción se mantiene en fase endoenergética, y si llega a fase exoenergética, la transmisión de calor por convección está íntimamente ligada a la estabilidad.

A la hora de valorar la influencia de los combustibles en el peligro de incendio en muchos modelos de determinación del riesgo se utiliza una metodología muy extendida en todos ellos, basada en los llamados “**modelos de combustible**”. Esta metodología se basa en definir una serie de modelos de combustible, cada uno con un comportamiento asignado diferente ante el fuego. De tal manera que a partir de su conocimiento se puede estimar el comportamiento más probable de un incendio en un lugar y en un momento dados.

En Estados Unidos, ya en 1914, se combinaron observaciones de cobertura y condiciones meteorológicas para establecer tres tipos de comportamiento del fuego: Pastizal, matorral y Bosque. En los años 70 el sistema evoluciona hasta el actual de los modelos de combustible, existiendo la versiones Americanas: del NFDRS (Sistema nacional de peligro de Incendios) y del NFL Laboratorio de Incendios Forestales (Rothermel 1972,1983,1986). La elaboración de esta metodología está basada en multitud de experimentos.

Existe en la bibliografía (Vélez, 2000) una versión simplificada de los trece modelos de Rothermel, que fue adoptada en su momento por el antiguo ICONA y sigue aplicándose en la actualidad, ya que esos trece modelos encajan bastante bien en los distintos modelos existentes en España.

Esta metodología supone que la estructura de la vegetación puede influir en el proceso de propagación de un incendio, y por ello, considera necesario su conocimiento para la gestión. Cada uno de los modelos indica lo que se está quemando en un incendio. En ningún caso están referidos a los tipos de vegetación potencial sino al tipo de

combustible que se está quemando, si son matorrales o arbolado joven por ejemplo, sin entrar a valorar la composición florística.

Los trece modelos pueden dividirse en 4 grupos: Pastos y hierba seca, Matorral, Hojarasca bajo arbolado, Restos de corta y operaciones selvícolas. Existen claves en la bibliografía para identificar cada uno de ellos. A continuación presentamos cuales son los 13 modelos de combustible de forma simplificada con algunos ejemplos de algunos que pueden encontrarse en la Península Ibérica :

Grupo: Pastos y hierba seca

Modelo 1: Pastizal Bajo. Ejemplo: Pradera.

Modelo 2: Arbolado abierto con pastizal, Matorral disperso. Ejemplo: Dehesa

Modelo 3: Pastizal alto. Ejemplo: Cereal.

Grupo: Matorral

Modelo 4: Matorral Alto y Continuo. Ejemplo: Maraña de brezal y Pino.

Modelo 5: Matorral verde. Ejemplo: Zona de helecho denso y verde.

Modelo 6: Matorral Mediano. Ejemplo: Zona densa de brotes de Rebollo.

Modelo 7: Matorral muy inflamable. Ejemplo: Brezales densos o jarales.

Grupo: Hojarasca bajo arbolado

Modelo 8: Hojarasca Compacta en Bosque cerrado. Ejemplo: Bosque de pino limpio sólo con Hojarasca

Modelo 9: Hojarasca no compactada en Bosque. Ejemplo: Bosque de pino, roble o castaño.

Modelo 10: Arbolado con gran cantidad de combustible muerto y pesado en sotobosque y regeneración. Ejemplo: bosque de pinos con muchas ramas caídas y pinos jóvenes en regeneración.

Grupo: restos de corta y operaciones selvícolas:

Modelo 11: Desechos ligeros. Ejemplo: Desechos que no cubren de forma continua el suelo.

Modelo 12: Desechos medios. Ejemplo: Desechos que cubren completamente el suelo.

Modelo 13: Desechos pesados. Ejemplo: Espesor de desechos continuos de 1 m de espesor.

Los 13 modelos de combustible sistematizan en una clave todos los factores de los combustibles tanto vivos como muertos como: distribución de la vegetación, material combustible disponible, etc. Cada modelo lleva asociada una determinada conducta del fuego, de tal manera que definiendo el modelo mediante la clave puede estimarse el comportamiento que tendrá el fuego durante su desarrollo.

Estos modelos pueden tener su utilidad para elaborar sistemas de simulación de propagación del fuego, y en las labores de extinción, dónde tan importante es estudiar la conducta que puede adoptar el incendio dependiendo de las características del área por donde transcurre. También puede ser utilizado para elaborar cartografías de diferentes tipologías de cubierta vegetal en función de su conducta ante el fuego. Pero este sistema no aporta un valor predictivo al problema del fuego. Puede determinar como se desarrollará con más probabilidad de riesgo un incendio, pero no ayuda a determinar cuándo, cuestión también importantísima en la gestión.

La humedad del combustible tan decisiva, sea cual sea el modelo definido por este sistema, es la que va a permitir o inhibir la aparición y propagación del fuego. La aparición del fuego estará condicionada por la humedad que tengan esos combustibles, de tal manera que solo lo hará cuando el contenido de humedad sea bajo. Definir un modelo de combustible no nos permite saber si ese contenido de humedad es alto o bajo y, por lo tanto, no sabemos si está en disposición de arder. A nuestro juicio, según lo expuesto en este apartado, la humedad del combustible depende directamente del contenido de humedad de la atmósfera en el momento pasado y presente y, por lo tanto, la predicción de la humedad atmosférica sí nos permitirá definir un riesgo futuro. Junto con un buen modelo de predicción de incendios basado en condiciones meteorológicas, el sistema de modelos de combustibles puede cumplir una labor importante en la lucha contra los incendios, pero por sí sólo adolece del carácter predictivo de fuego.

Un hecho fisiológico a considerar en la problemática del fuego es el estrés hídrico en la vegetación viva. En situación de sequía no permanente se produce una disminución del

contenido de agua ambiental durante un periodo determinado de tiempo que provoca una disminución del potencial hídrico en las plantas. En nuestro clima, estacionalmente existen dos periodos donde podemos encontrarnos ante una situación así (final del invierno y en verano), y la vegetación ha adquirido adaptativamente mecanismos de resistencia. Ese descenso de la humedad ambiental y en las plantas, conocido en fisiología vegetal como estrés hídrico moderado, va a afectar a diferentes procesos de la planta pero no tiene porqué conllevar su muerte. La planta trata de adaptarse para perder la menor cantidad de agua posible por transpiración, y una de sus primeras respuestas es el cierre de los estomas. Esto conlleva una reducción de la actividad fotosintética y de fijación de CO_2 a sus niveles mínimos posibles. Cuando la situación de déficit de agua desaparece la planta vuelve a abrir sus estomas de forma regular y la producción vegetal retorna a su óptimo. Estos mecanismos suelen suceder sobre todo en las plantas vivaces. Las plantas anuales responden con resistencia a la sequía estival muriendo y produciendo semillas que iniciarán el ciclo al final del verano. Los incendios de invierno suelen por ello afectar a masas vegetales vivas pero que se encuentran bajo una situación de estrés hídrico y son más vulnerables ante el fuego.

Dos afirmaciones suficientemente aceptadas por la comunidad científica en relación al contenido de humedad de los combustibles son:

- El contenido de humedad en los combustibles vivos depende de las variaciones de las condiciones meteorológicas a lo largo del año (Castro 2002, 2003, 2006).
- Los combustibles muertos dependen mucho más fuertemente aún que los vivos de las condiciones de humedad ambiental.

Uno de los parámetros a considerar en el riesgo de fuego es, desde luego, el contenido de humedad en combustible fino vivo y muerto. Es ampliamente compartido entre la comunidad científica que estudia el fuego que la mayoría de los incendios tienen su inicio en el combustible fino, por lo que, estudiar la evolución de su contenido de humedad y su relación con la humedad atmosférica es un elemento importante para conocer mejor los procesos físico-atmosféricos asociados a la aparición de los incendios silvestres. Los combustibles finos solo pueden ganar humedad por absorción radicular si están vivos o por absorción directa si están muertos. Pero es necesario un aporte externo por precipitación o superavit edáfico.

La evaporación y la transpiración en la atmósfera son los dos procesos de pérdida de humedad por parte de los combustibles finos muertos y vivos respectivamente. El poder

deseicante de la atmósfera acelera los procesos de evaporación y transpiración y reduce los contenidos de humedad sobre todo en el que corresponde al combustible fino muerto. Un aire casi saturado no tendrá un poder deseicante alto. Un aire lejos de su saturación sí posee poder deseicante. Si el poder deseicante es alto, el contenido de agua del combustible fino muerto y también del fino vivo disminuirán por evaporación y transpiración respectivamente. Y reducir el contenido de agua ya sabemos que supone aumentar el riesgo de inflamación y el del inicio de un incendio.

Una gran parte de la bibliografía se ha dedicado a la evolución del contenido de humedad del combustible fino muerto por su importancia en los procesos de combustión y propagación. Diferentes modelos empíricos como los mostrados en el capítulo VI de esta tesis se han desarrollado estimando el contenido de humedad del combustible fino muerto, para incorporarlo en varios índices meteorológicos y estimar el riesgo de fuego. El contenido de humedad del combustible fino muerto es un parámetro que nadie discute de enorme peso en los modelos de riesgo de fuego (Van Wagner 1972a, Rothermel 1983), ya que de él depende que el proceso de combustión, en sus inicios y fases de desarrollo posteriores, se realice en condiciones de exoenergía. El agua del combustible fino muerto sólo depende de condiciones meteorológicas fácilmente medibles como la humedad atmosférica. Nuestra opinión es que, hablar de humedad en la atmósfera es hablar prácticamente de humedad en el combustible fino muerto. Los resultados de correlaciones entre el contenido de humedad del combustible fino muerto en eucaliptales y pinares en España con respecto a parámetros de sequedad como el déficit de saturación han sido bastante significativos (Simal 2006).

El combustible fino vivo tiene un papel secundario debido a que indiscutiblemente la importancia del combustible fino muerto es muy grande. El cálculo de la humedad del fino muerto simplifica mucho los modelos por su sencillez de medida, y en cambio el cálculo del contenido de humedad el fino vivo es mucho más complejo.

No obstante estudios respecto al contenido de humedad del combustible fino vivo (Castro et al. 2002, 2003, 2006) apuntan a que éste puede jugar también un papel importante en los inicios de un incendio, y sobre todo en las subsiguientes fases de propagación del fuego. Sería relevante este hecho en los grandes incendios que afectan a extensas masas forestales así como en los incendios que tienen lugar sobre combustible vivo como los acontecidos en invierno.

En el combustible vivo, también, cuando el contenido de humedad es alto, el inicio y la evolución del fuego se ve frenada debido a que la energía emitida por el foco es

interceptada para un proceso de evaporación. Esto provoca que el calor necesario para llegar a la inflamación del material vegetal vivo inicial sea insuficiente.

En condiciones meteorológicas de sequedad el agua del combustible fino vivo, al igual que sucede en el muerto, se pierde en este caso por evapotranspiración, y en esas condiciones el combustible fino vivo se convierte en una fuente potencial para el fuego. La mayoría de los materiales afectados en la propagación de grandes incendios de copas son combustibles vivos finos y gruesos que han visto reducido su contenido de agua.

Al hablar del contenido de humedad en el combustible vivo, debemos tener en cuenta que podemos tener diferentes estratos de vegetación, con comportamientos bien distintos ante situaciones de poder desecante alto:

1. Plantas con un máximo de contenido de humedad en sus tejidos coincidente con las estaciones lluviosas. Dependen muy directamente del contenido de humedad en el suelo.
2. Plantas con máximo contenido de humedad durante la floración y un pequeño máximo en estaciones lluviosas.
3. Plantas que sufren unas variaciones muy ligeras en su contenido de humedad a lo largo del año independientemente de si la estación es seca o húmeda.

El tipo número 1 son generalmente plantas anuales del estrato herbáceo que constituyen el combustible fino vivo cuyo contenido acuoso en sus tejidos es muy dependiente de las condiciones meteorológicas. Como sucedía con el combustible fino muerto. Este constituye un combustible que es susceptible de ignición si las condiciones son de elevado poder desecante. Ante condiciones adversas de sequedad su contenido de agua disminuye favoreciendo la reacción de combustión, tal y como puede suceder con el fino muerto. Es un combustible a tener en cuenta en los primeros estadios de un fuego.

A escala anual se han observado dos mínimos de contenido de humedad en el contenido del combustible fino vivo de plantas de tipo 1 (Castro et al 2006.). Uno a comienzos de la primavera y otro en el verano.

La evolución diaria de la humedad del combustible fino muerto ya es sabido que se correlaciona bastante bien con la humedad atmosférica. Pero Castro et al (2006) han llegado a la conclusión de que el combustible fino vivo de plantas de tipo 1, incluso en la escala diaria se encuentran también en fase con la humedad atmosférica, existiendo una correlación alta. Durante el día por el descenso de la humedad atmosférica y el

aumento de la temperatura la evaporación y transpiración vegetal aumentan, descendiendo el contenido de humedad en ambos combustibles. Luego, durante la noche, se invierte el proceso recuperándose el nivel de humedad. La evaporación desciende, y se produce el cierre estomático reduciendo la transpiración. La evolución diaria es unimodal, con un mínimo en el comienzo de la tarde y un máximo en la madrugada. Esta es otra de las explicaciones de que los incendios surjan con mayor facilidad en las primeras horas de la tarde. Ese ciclo va en sintonía con la variación de la humedad atmosférica diaria. Pero cuando las condiciones meteorológicas adversas de alto poder desecante de la atmósfera son persistentes, el ciclo de humedad del aire a escala diaria puede romperse no permitiendo la recuperación del agua en los combustibles finos, alcanzándose niveles muy bajos de humedad, e incrementando el riesgo de fuego.

Monitorizar humedad del aire, es monitorizar los contenidos de humedad de los combustibles finos, y así detectar si están en disposición de arder con facilidad.

El contenido de humedad del combustible vivo del estrato arbustivo correspondiente al tipo número 2 no varía drásticamente a escala diaria en función de las condiciones de humedad el entorno. A escalas temporales mayores su contenido de humedad sí puede verse alterado si la situación de sequedad del entorno es muy persistente durante varios días. En periodos de no floración y escasez de precipitación el contenido acuoso se puede ver reducido lo suficiente como para que se convierta en un combustible vivo susceptible de ignición. Monitorizar el la humedad atmosférica de forma continuada a lo largo del tiempo, permite detectar periodos con persistencia de sequedad y situaciones de déficit hídrico en el estrato arbustivo, que son de especial riesgo de incendio. Que el fuego afecte a este estrato, depende de que el fuego pueda pasar de ser de suelo para convertirse en uno de copas por la facilidad de alcanzar desde aquí al estrato arbóreo.

El estrato arbóreo (tipo 3) apenas varía su contenido de humedad a lo largo del año. Puede sufrir variaciones a escala estacional alcanzando el mínimo en las estaciones que fueran secas. Un seguimiento de la humedad atmosférica y la precipitación a lo largo del año podría permitirnos detectar en nuestra región cuales son las estaciones en las cuales este combustible vivo podría contener menos agua, pero no obstante en un principio no es un combustible en el que se inicie el fuego ya que no sufre prácticamente cambios. Se puede convertir en potencial combustible vivo, en estación seca, cuando en fases avanzadas de la propagación de un incendio éste pasa a ser un incendio de copas, desencadenado inicialmente en los estratos herbáceo y arbustivo.

La evolución anual en la Península Ibérica del contenido de humedad del combustible vivo de las plantas herbáceas y arbustivas posee dos mínimos (Castro et al 2006.) (ver figura II.2.1). Mucho más marcado en plantas del estrato herbáceo que en las arbustivas. Uno a finales del invierno y otro en el medio del verano. Justamente coincidiendo con los dos mínimos de precipitación registrados en regiones mediterráneas como el oeste de Castilla y León, tal y como fue presentado en trabajos anteriores de este grupo investigador (ver figura II.2.2). Son mostrados también en esta figura a escala anual los modos frecuenciales del número de incendios totales registrados en el área geográfica comprendida por León, Zamora y Salamanca, durante un periodo de años suficientemente representativo, y se observan dos máximos estacionales a finales del invierno y en el verano, alcanzándose altos valores de correlación negativa con la precipitación. A escala anual, las estaciones de sequedad previas a periodos de lluvias en nuestro clima coinciden con los mínimos en el contenido de humedad en combustible fino vivo (plantas herbáceas y arbustivas), y a su vez existe una correspondencia con los máximos de incendios a escala anual en el oeste de Castilla y León.

El combustible fino muerto también debe responder de la misma manera porque su influencia con respecto a los factores atmosféricos, como el poder desecante de la atmósfera, es muy alta.

En cambio en la figura II.2.1. observamos como las plantas de estrato arbóreo como el pino no se ven afectadas apenas en su contenido de agua por el factor estacional de la precipitación.

La evolución en la aparición del fuego, en fase con la sequedad a escala anual, existe también para otras regiones limítrofes con esa área geográfica (León, Zamora y Salamanca) como Galicia y Tras os Montes (Portugal). El fuego surge a la vez bajo diferentes escalas temporales en una región equivalente a la mesoescalar, y eso sólo puede ser debido a que las condiciones de baja humedad atmosférica y alto poder desecante, que disminuyen los contenidos de agua de los combustibles, son comunes en toda esa región.

Los incendios aparecen cuando las condiciones de sequedad son las dominantes. Detectando y pronosticando a una escala mesoescalar las condiciones de sequedad, podremos adelantarnos al fuego porque sabremos cuando se darán las situaciones para las que la vegetación es más vulnerable.

Figura II.2.1 Contenido de humedad en diferentes combustibles forestales vivos de los estratos de vegetación de la región mediterránea peninsular. Fuente: Castro et al 2006.

Figura II.2.2. Valores medios mensuales del número de incendios (León, Zamora y Salamanca, serie 1988-2000) y valores medios mensuales de precipitación en mm (serie de 1961-1990).

Bajo condiciones de sequedad el combustible es más susceptible de perder el agua que contiene (tanto el muerto como el vivo) sobre todo los finos que es donde suelen comenzar los incendios, y los que más dependen de los factores ambientales a escala diaria.

El contenido de humedad retenido y acumulado en el suelo, y en los combustibles (sobre todo los arbustivos y arbóreos vivos y gruesos muertos) en días anteriores, que puede influir en el riesgo de fuego presente, puede ser definido por medio de un término que englobe el estado meteorológico del pasado. En dicho término podrían incluirse además, otras características propias inherentes como: la edafología, serie de vegetación, condiciones hidrodinámicas, etc. Existe un efecto inercial, y las condiciones de vegetación, edáficas, etc, no cambian mucho de un día a otro, como sí lo hacen la meteorológicas.

II.3. La Evaporación en la atmósfera

Uno de los procesos físicos acontecidos en la atmósfera, de vital importancia en la existencia o no de incendios, es la evaporación. Por medio de ella, los potenciales combustibles de un incendio pierden el agua que contienen y pueden llegar con más rapidez a la temperatura de inflamación. Se trata de un mecanismo que, si es dominante en una zona, generará una mayor facilidad para que el fuego afecte a las formaciones vegetales. Del mismo modo se puede realizar la afirmación opuesta, si la evaporación no domina un entorno los incendios no aparecerán. Podríamos decir que la evaporación en sí misma sería posible utilizarla como un índice de riesgo de fuego en este sentido.

A escala molecular la evaporación es el proceso mediante en cual un líquido (en nuestro caso el agua) o sólido, pasa a la forma de vapor o gas, como resultado del aumento energía cinética de las moléculas individuales. En una masa de agua, algunas de las moléculas cercanas a la superficie pueden llegar a poseer una energía cinética tan elevada que escapan y, por lo tanto, pasan a formar parte del aire circundante, en nuestro caso la atmósfera. La energía cinética es mayor en las moléculas de la superficie cuanto mayor sea su temperatura. A la inversa, es posible que las moléculas evaporadas ocupen el espacio adyacente a la superficie del líquido y puedan volver a penetrar en él, si su energía disminuye. Este último describiría un fenómeno de condensación. Existe una pequeña capa de aire en la cual están teniendo lugar ambos fenómenos, y en función de cual sea el predominante hablaremos de evaporación o de condensación. Si el flujo

neto de moléculas desde la superficie del líquido es negativo hablaremos de evaporación.

Uno de los factores que produce la evaporación es un aumento de la temperatura de la superficie del líquido, pero existen otros que la favorecen como: difusión del aire adyacente a la superficie y la sequedad del aire, entre otros.

La evaporación desde un punto de vista macroscópico, como el que nos interesa analizar en el fenómeno del fuego, es el agua que escapa de la superficie de la Tierra hacia la atmósfera en forma de vapor, bien libremente, en cuyo caso se denomina evaporación en sentido estricto, o a través de las plantas, en cuyo caso se define como transpiración. El fenómeno en su conjunto es definido como evapotranspiración. A continuación nos referiremos a la evaporación estrictamente. Más adelante dedicaremos nuestra atención a la evapotranspiración.

La evaporación potencial es la cantidad de vapor emitida por una superficie de agua pura por unidad de superficie y unidad de tiempo. Puede ser medida directamente por medio de evaporímetros pero existen una serie de expresiones empíricas que nos proporcionan estos valores, ajustándose bastante a los datos reales. Aquí presentamos escuetamente las dos más representativas:

- Ecuación de Penman.

La expresión aerodinámica de Penman (1948) propuesta para el cálculo de la evaporación es la siguiente:

$$E_0 = 0,35 \left(0,5 + \frac{u}{100} \right) (e_a - e_d) \quad [\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}] \quad (\text{II.3.1})$$

dónde :

E_0 es la evaporación potencial

u es la velocidad del viento en $\text{km} \cdot \text{día}^{-1}$

$(e_a - e_d)$ es el déficit de saturación

La acción del viento se manifiesta en dicha expresión como una función de tipo lineal y el déficit de saturación como la diferencia de presión de vapor en milímetros de mercurio a un nivel de dos metros aproximadamente.

- Ecuación de Ivanov (1954):

$$E = 0,0018(t + 25)^2(1 - h) \quad [\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}]. \quad (\text{II.3.2})$$

dónde :

E es la evaporación en $\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$.

t es la temperatura en grados Celsius.

h es la humedad relativa en tanto por uno.

La evaporación potencial es un factor cuyo valor es sólo relativo desde el punto de vista agroforestal. Es más importante, y por supuesto más difícil, evaluar la evapotranspiración potencial en la que entra en juego la transpiración vegetal.

Los factores que más influyen en la evaporación son en menor medida:

- La temperatura del aire y de la superficie.
- La Radiación neta recibida en la superficie.

Y en mayor medida:

- Presión Barométrica
- Área
- Temperatura del agua
- La Velocidad del viento.
- Contenido de humedad del aire.

Si la temperatura es constante, a mayor presión menor evaporación.

La cantidad de agua evaporada aumenta con el área.

La evaporación aumenta con la temperatura del agua. Cuando el agua es más fría que la temperatura del punto de rocío del aire, la evaporación es negativa y tiene lugar la condensación (rocío), pero cuando el aire es más frío que el agua la evaporación tiene lugar.

La evaporación aumenta con la velocidad del viento presumiblemente mediante la acción del fenómeno de la difusión y del gradiente de presión de vapor cerca de la superficie.

La relación entre la sequedad del aire y la evaporación, que se ha observado en medidas con psicrómetros o diferencias de temperatura de termómetro húmedo y seco, es directa.

La temperatura del aire y la radiación neta no influyen de manera tan determinante en el proceso de evaporación como lo hacen el resto.

La Velocidad del viento y el contenido de humedad del aire juegan un papel importante en la evaporación pero sobre todo el contenido de humedad del aire. Cuanto más saturado esté el aire del entorno mayor será la dificultad con la que tendrá lugar la evaporación.

La evaporación es un mecanismo de pérdida de humedad en los combustibles finos, sobre todo en el muerto, en el que suelen comenzar los incendios. En las diferentes expresiones empíricas de la evaporación de la bibliografía contemplan en mayor o menor medida los diferentes factores que influyen en el proceso. Desde luego que uno de los factores que más aparece es la humedad del aire junto con la velocidad del viento. La existencia de estos dos factores de manera simultánea, o por separado, darán lugar a una pérdida de agua en los materiales combustibles produciendo que el fuego pueda hacer acto de presencia. Con un seguimiento de la humedad atmosférica y la velocidad del viento indirectamente tendremos conocimiento de la posibilidad del mecanismo de evaporación y, por lo tanto, del riesgo de fuego.

Uno de los parámetros más importantes que pueden evaluarse es el poder desecante de la atmósfera (*Drying Power*). El poder desecante de la atmósfera resulta de la combinación del efecto del viento y el déficit de humedad (Brutsaert and Stricker 1979) y puede expresarse como:

$$E_a = f(u)(e_a^* - e_a) \quad [\text{mb} \cdot \text{día}^{-1}] \quad (\text{II.3.3})$$

dónde:

e_a es la presión de vapor del aire en milibares.

e_a^* es la presión de vapor del aire saturante en milibares.

$f(u)$ es una función del viento. Que según Brutsaert and Stricker :

$$f(u) = 0,26(1 + 0,54u_2) \quad (\text{II.3.4})$$

dónde:

u_2 es la velocidad del viento a 2 metros de altura en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$(e_a^* - e_a)$ es el déficit de humedad, que es equivalente al déficit de saturación energético D de la bibliografía. Por lo tanto el déficit de saturación D combinado con el efecto del viento puede representar el Poder Desecante del aire.

$$E_a = f(u) \cdot D \quad (\text{II.3.5})$$

Un tipo de viento teórico como es el viento geostrófico podría evaluarse y ser introducido en esta expresión pero se trata de un viento a escala sinóptica y los incendios surgen a escalas menores. Una forma indirecta de evaluar el efecto del viento a escala mesoescalar es teniendo en cuenta la estabilidad de la columna atmosférica. A más baja sea la estabilidad mayores podrán ser las ascendencias y mayores los vientos en superficie según el principio de conservación de la masa.

Un parámetro inédito definido en esta tesis, relacionado con el viento y su incidencia en el Poder desecante de la atmósfera, es la aceleración vertical del aire en las proximidades de un incendio, directamente ligado con la estabilidad. A menor estabilidad, mayor es la aceleración vertical del aire y por principio de conservación de la masa mayor será la aceleración de los vientos en superficie.

En esta tesis también se define otro parámetro inédito directamente ligado con el concepto de Poder desecante, es el llamado Poder Evaporante de la Atmósfera (PEA). Se trata de un parámetro termodinámico calculado para la columna atmosférica del momento que nos indica el grado de capacidad desecante de la columna de aire que existe sobre una región. No toma pues un valor representativo de un nivel, sino de toda la columna. Es un buen parámetro que puede ayudarnos a determinar el mayor o menor riesgo de fuego.

Volviendo a la expresión (II.3.5) recordemos que la regla del 30, utilizada en la gestión de lucha antifuego, dicta que cuando la velocidad del viento es superior a $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ el riesgo de fuego es alto. Valores de velocidad del viento de ese orden generan una f de 4,47. Para una velocidad del viento dada, el poder desecante de la atmósfera es directamente proporcional al Déficit de saturación D . Por ejemplo para una velocidad de $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$:

$$E_a = 4,47 \cdot D \quad (\text{II.3.6})$$

La expresión (II.3.5) podría ser útil como indicador del riesgo de fuego si no fuera por su construcción. Al ser un producto de los dos términos se puede llegar a conclusiones similares con situaciones diferentes. Es el error común en muchos de los índices definidos en bibliografía. Lo más conveniente sería un acoplamiento en vez de un producto.

Cuanto mayor sea la velocidad del viento mayor es f y, por lo tanto, mayor es el poder desecante E_a . Pero el déficit de saturación D ejerce un gran peso en el valor final de E_a , y podemos encontrarnos ante valores similares del poder desecante y, por lo tanto, ser de riesgo de fuego alto, y sin embargo con situaciones de viento y D muy distintas. Por ejemplo $E_a = 45$ es resultado el producto $15 \cdot 3$ pero también del producto $3 \cdot 15$. En el primer caso la velocidad del viento es mucho mayor de $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ y, por lo tanto, de riesgo según la regla del 30, y D es correspondiente a un día de dominio húmedo, de riesgo de fuego bajo. En el segundo caso la velocidad del viento es menor de $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, y la D pertenece al dominio seco de riesgo alto o muy alto. E aquí un ejemplo en el que existiendo el mismo poder desecante sin embargo se tratan de situaciones de riesgo de fuego opuestas. La construcción de un índice con un producto no es la más adecuada.

Considerando que la variabilidad de la velocidad del viento es muy amplia a escala diaria, independientemente del contenido de humedad del aire, ha sido analizada por este equipo investigador una base de datos del número de incendios diarios. Es una base lo suficientemente amplia en Galicia y en otras zonas del noroeste peninsular, y en ella se ha observado que se agrupan explícitamente los días con mayor número de incendios en los días de dominio seco y sin embargo en los días de dominio húmedo apenas acontece el fenómeno. Este hecho objetivo hace que concluyamos que el efecto del viento en el poder desecante de la atmósfera no es igual de importante si nos encontramos en dominio húmedo que si estamos en dominio seco. En dominio seco la contribución del efecto del viento al poder desecante se traduce en riesgo de fuego. Sin embargo en dominio húmedo, por muy alto que sea el efecto del viento, ello no se traduce en el número de incendios. El papel más importante es jugado por el déficit de saturación, por la sequedad del aire. Para un viento dado en dominio seco el riesgo aumenta, pero en dominio húmedo sucede al contrario, el riesgo disminuye.

Para poder evaluar la sequedad del aire, y así el peligro de incendios adecuadamente, es necesario establecer un índice de sequía que tenga en cuenta estos aspectos. En la bibliografía se encuentran definiciones de sequía basados en la combinación de factores

como: Precipitación, temperatura, humedad, evaporación, transpiración de las plantas, etc.

La precipitación es el factor más influyente en la sequía, y prácticamente todas las definiciones de índices usan esta variable combinada con otros elementos meteorológicos. Por ejemplo, una de las definiciones se basa en la combinación de evaporación, según la expresión de Ivanov, y la precipitación:

$$K = \frac{P}{E} \quad (\text{II.3.7})$$

dónde:

P es la precipitación anual en mm.

E es la evaporación anual en mm derivada de la expresión de Ivanov.

Cuando K adquiere valores <0 estamos en situación de sequía.

Han sido propuestos en la bibliografía más índices de sequía pero son definidos en su mayoría para un periodo anual, y es demasiado largo haciéndose necesario poder acotar el cálculo de un índice para periodos inferiores.

Se necesita un índice de sequedad que pueda calcularse a una escala inferior a la estacional. Los incendios surgen en una escala mesoescalar, luego un índice a esa escala sería el más adecuado para establecer el riesgo de la aparición de fuego. El déficit de saturación D conocido en bibliografía y utilizado en esta tesis en términos energéticos, es capaz de definir la sequedad existente en un día en concreto. Monitorizando el parámetro D de manera continua puede obtenerse el estado de sequedad de los días pasados. Si la sequía es persistente durante un periodo largo de tiempo ello se verá reflejado en los déficit de saturación para todos y cada unos de los días de ese periodo. Si tuvo lugar precipitación quedó también reflejado en los valores bajos de D diarios. Por lo tanto, no se hace necesario, utilizando D, aportar datos de precipitación, que complican el proceso de evaluación de la sequedad, como hacen algunos índices.

II.4. La Evapotranspiración y el balance hídrico

Otro proceso de pérdida de humedad que tiene lugar en la atmósfera es la transpiración a través de los estomas durante la actividad fisiológica de los vegetales.

Por medio de él los combustibles vivos liberan vapor a la atmósfera reduciendo su contenido de agua. Cuando la transpiración es muy alta los vegetales vivos llegan a ser combustibles potenciales de fuego porque pueden alcanzar más fácilmente la temperatura de inflamación debido a la menor cantidad de agua en sus tejidos.

En su momento ya fue definida la evaporación. La acción combinada del proceso biológico de transpiración de las plantas y el de evaporación es conocida con el término de evapotranspiración. La evapotranspiración es la suma total del agua que se evapora por el suelo y por la transpiración de los vegetales que están sobre él.

La evapotranspiración potencial (E.T.P), concepto introducido por Thornthwaite en 1948 (Thornthwaite 1948), es un concepto útil para estudios sobre balances de humedad del suelo y necesidades hídricas de las plantas. La ETP puede ser tomada directamente por medio de lisímetros, pero debido a que las medidas directas suelen ser insuficientes, el cálculo de la ETP se aborda de forma estimativa a partir de fórmulas empíricas como la de Thornthwaite (1948) o la de Penman (1963). La de Thornthwaite es la más conocida, y define la evapotranspiración potencial ETP como la suma total del agua que se evapora por un suelo saturado de humedad y la transpiración vegetal, pudiéndose medir en cm o en mm. Como el suelo no siempre está saturado de humedad la evapotranspiración real ETR siempre será menor que la potencial.

Thornthwaite obtuvo la siguiente ecuación empírica de la ETP para un mes de 30 días de duración :

$$E = 1,6 \left(\frac{10t}{I} \right)^a, \quad (\text{II.4.1})$$

dónde:

E es la evaporación potencial mensual en cm de altura de agua.

t la temperatura media mensual de la estación.

I y a son constantes de cada lugar.

El valor de I se obtiene por la suma de 12 índices mensuales por la fórmula:

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514} \quad I = \sum_1^{12} i \quad (\text{II.4.2})$$

el valor de a se obtiene:

$$a = (67,5 \cdot 10^{-8} I^3) - (77,1 \cdot 10^{-6} I^2) + (0,0179 I) + (0,492) \quad (\text{II.4.3})$$

Penman (1948) diseñó otra ecuación para estimar la ETP, que no mostraremos aquí, y que ha sufrido diversas modificaciones por distintos autores en la bibliografía (Kohler y Parmele 1967). Otros métodos son los de Blaney-Criddle (1962), Turc (1961) o Morton (1971), (1975), (1978).

Aunque ninguna de las expresiones empíricas de la ETP integra perfectamente todos los factores climáticos, edáficos y de vegetación, la más utilizada es la expresión de Thornthwaite.

La ETP depende (según Penman o Morton) de las presiones de vapor del aire y del aire saturado, que en definitiva son medidas del contenido de humedad de la atmósfera. Tanto Morton como Penman dan un peso a la diferencia que existe entre la humedad del aire en saturación y la humedad del aire en sus expresiones empíricas. Y esa diferencia de presiones de vapor es equiparable al déficit de saturación D conocido de la bibliografía. La pérdida de agua por ET está directamente relacionada con el déficit de saturación D , si suponemos que el resto de los factores son constantes, y es un tipo de relación directa, de tal manera que la ET es más alta cuanto mayor sea D del momento. Pérdidas altas de agua por ET del combustible vivo se corresponden con altos valores de D , lo que aumenta el riesgo de fuego en una región.

Castro et al (2006) muestran como el contenido de humedad en los combustibles vivos, sobre todo en los finos, es menor en las estaciones secas del clima mediterráneo, donde aparecen los modos frecuenciales de fuego a escala anual. El estado de la vegetación viva en lo que al contenido de humedad se refiere y, por lo tanto, de su facilidad de ignición, depende de los condicionamientos atmosféricos, más concretamente de la sequedad atmosférica, porque ésta influye de manera directa en el principal mecanismo de pérdida de contenido de agua (ET). Lo que nos indica que estudiando las condiciones de sequedad del aire que favorecen la ET, conoceremos cuando el fuego se ve facilitado en los combustibles vivos. Resulta más directo y conveniente a efectos operativos analizar la sequedad del aire que la evapotranspiración, ya que es el factor que rige en definitiva la pérdida del contenido de agua del combustible vivo, determinante en el riesgo de fuego.

Una excesiva transpiración en la vegetación viva, por una exposición prolongada a un déficit de humedad atmosférico, provoca que ésta entre en estrés hídrico reduciendo su actividad productiva como medida de resistencia. El encontrarse en estrés hídrico hace a las plantas vivas más vulnerables al fuego. Si el agua disponible para el sistema radicular en el suelo se ve además reducido por evaporación o drenaje, el estrés hídrico se alcanzará antes cuando la humedad atmosférica se encuentre a niveles bajos.

Hemos estudiado los procesos por medio de los cuales las plantas vivas pueden perder humedad. Pero existe un mecanismo por medio del cual la vegetación climatofila gana en contenido de agua, y es la precipitación. La diferencia entre la precipitación y el agua perdida por ET es lo que se ha definido como balance hídrico. Puede calcularse a escala mensual, estacional o anual. Si el balance es positivo hay superavit de agua y si es negativo hay déficit. Si es cero es que la precipitación es igual a la ETP.

Balance hídrico: $P-ETP$

(II.4.4)

Cuando el balance hídrico es positivo siempre queda una cantidad de agua que se incorpora al agua acumulada en la reserva del suelo. Cuando el balance es negativo el agua de la reserva comienza a perderse, pudiendo incluso desaparecer en algunas zonas ante episodios prolongados de balance negativo.

Desde 1998 el servicio de Aplicaciones Climatológicas del INM viene desarrollando un balance hídrico para estimar la máxima capacidad de saturación que presenta el suelo, y así ha publicado un boletín del balance hídrico para toda España. Sin entrar en los detalles del modelo empleado, decir que los *inputs* del modelo son complejos y numerosos, yendo desde datos fisiográficos y edáficos, pasando por los consabidos datos meteorológicos. Todo ello supone un avance en el campo de la hidrometeorología y sus aplicaciones en la agricultura, humedales, protección civil, lucha contra incendios, etc.

El Boletín, con una aparición cada 10 días, contiene una serie de mapas en los que se muestra la distribución geográfica, en el ámbito de la España peninsular y Baleares, de los distintos parámetros (precipitación, evapotranspiración y reserva de humedad del suelo) que configuran el Balance Hídrico cuya evaluación se efectúa diariamente en la Sección de Meteorología Hidrológica del INM. El método de estimación de la ET en este procedimiento del INM es el de Penman-Monteith, que es una de las

modificaciones propuestas del método general de Penman. El viejo método de Thornthwaite para la estimación de la ETP está siendo sustituido por estos nuevos modelos. No obstante el de Thornthwaite es tan simple y elemental, y tan fácil de aplicar, que todavía resulta útil para obtener al menos una primera aproximación del balance hídrico en determinados puntos. Algunas de las imágenes resultantes de los modelos actuales pueden verse a continuación en las figuras II.4.1, II.4.2 y II.4.3 a modo de ejemplo para la Península y Baleares. Son mostradas respectivamente la Precipitación acumulada, evapotranspiración y reserva de agua en el suelo a fecha 20 de diciembre de 2006, utilizando como fecha de referencia el 1 de septiembre, inicio del año hidrológico.

Figura II.4.1. Precipitación acumulada desde el 1 de septiembre hasta el 20 de diciembre en la Península Ibérica y Baleares. Fuente: INM.

Podemos observar que pueden existir zonas donde el balance hídrico puede ser negativo a causa de que durante el periodo considerado la pérdida que agua por ETP es mayor que la precipitación. Si el balance hídrico es negativo la pérdida de humedad en el suelo es considerable, reduciendo la reserva, y acarreando un posible riesgo de fuego, porque afecta muy directamente en el contenido de humedad del combustible fino vivo, y sobre todo del fino muerto que es en el que suele surgir la ignición inicial. Este tipo de metodología pueden resultar útil en determinadas épocas desde el punto de vista de la gestión del fuego, porque identifican las zonas con fuertes reducciones de la reserva de agua acumulada y, por lo tanto, con riesgo de incendio.

Figura II.4.2. ET acumulada desde el 1 de septiembre hasta el 20 de diciembre en la Península Ibérica y Baleares. Fuente: INM.

Figura II.4.3. Reserva de agua en el suelo desde el 1 de septiembre hasta el 20 de diciembre en la Península Ibérica y Baleares. Fuente: INM.

El carácter de estos métodos para definir un riesgo de fuego es que indica dónde el riesgo puede ser mayor, pero posee un inconveniente, y es que carecen de capacidad predictiva; además de trabajar a una escala temporal muy superior a la que acontecen los episodios de fuego (oleadas de varios días). Como sucede con los métodos radiativos que utilizan índices de vegetación (NDVI) en teledetección, no indican a priori que días poseerán alto riesgo de incendios en las zonas de balance negativo o incluso en zonas de balance positivo, ya sea en entornos agroforestales o de interfase.

II.5. La Vegetación

Gran parte de los incendios silvestres en cualquier parte del mundo acontecen en el medio natural en el seno de masas vegetales. Por lo que es importante, a efectos de un completo conocimiento del fenómeno, saber cuales son las características específicas de dichas masas desde un punto de vista fitosociológico y botánico. El área de nuestro interés se centra en el cuadrante noroccidental de la Península Ibérica, ya que en gran parte de la presente tesis se hace especial mención a las áreas geográficas de la Comunidad Autónoma de Galicia y Castilla y León.

Sin llegar a un análisis muy profundo, queremos dejar plasmado en este apartado las características bioclimáticas, biogeográficas y las series de vegetación existentes en ambas regiones, así como realizar algunos comentarios al respecto.

En la figura II.5.1 podemos observar los macrobioclimas de Europa, y los bioclimas y variantes bioclimáticas existentes en España y Portugal según Rivas-Martínez et al (2002).

En la Península los macrobioclimas existentes son el Templado y el Mediterráneo. Dentro del templado se distinguen cinco bioclimas y variantes bioclimáticas, y dentro del mediterráneo son en cambio siete. En Galicia y el oeste de Castilla y León nos encontramos con los siguientes bioclimas y variantes: Templado hiperoceánico submediterráneo, templado oceánico, templado oceánico submediterráneo y el mediterráneo pluviestacional oceánico.

En la figura II.5.2 se observan los diferentes cinturones termoclimáticos en la totalidad de la Península Ibérica según Rivas-Martínez et al (2002). Se habla en la región Eurosiberiana de pisos: Alpino, subalpino, montano y colino con diferentes horizontes dentro de cada uno. La bibliografía actual habla de infratemplado, termotemplado, mesotemplado, supratemplado y orotemplado, y así es mostrado en la figura II.5.2. En la región mediterránea se habla de piso: crioromediterráneo, oromediterráneo, supramediterráneo, mesomediterráneo, termomediterráneo e inframediterráneo con diversos horizontes cada uno.

Son un total de 11 cinturones los que se pueden encontrar en la Península. Concretamente en Galicia y el oeste de Castilla y León encontramos: El termotemplado, Mesotemplado, Mesosubmediterráneo, supratemplado, suprasubmediterráneo, Orotemplado, orosubmediterráneo, mesomediterráneo, supramediterráneo y oromediterráneo. Todos excepto el termomediterráneo.

Fruto de los condicionantes bioclimáticos estudiados anteriormente y de las aportaciones de la Corología y la fitogeografía que analizan la presencia de familias, géneros y especies en diferentes áreas, puede establecerse una distribución biogeográfica de las especies y las comunidades vegetales.

Es presentada a continuación parte de la tipología biogeográfica hasta el nivel de sector de España y Portugal. En España y Portugal existen un reino, dos regiones, cuatro subregiones, 10 provincias, 15 subprovincias y 66 sectores. En las figuras II.5.3 y II.5.4 pueden observarse las regiones, subregiones, provincias, subprovincias y sectores existentes en la totalidad de la Península Ibérica.

Concretamente en la región noroccidental de la península donde están incluidas Galicia y oeste de Castilla y León la tipología es la siguiente:

B. Región Eurosiberiana

Bb. Subregión Atlántico Centroeuropea

4. Provincia Europeo Atlántica

4a. Subprovincia Cantabroatlántica

4.2 Sector Galaicoasturiano

4.3 Sector GalaicoPortugues

4.4 Sector Juresiano

4b. Subprovincia Orocantábrica

4.5 Sector Campurriano-Carrionés

4.6 Sector Ubiñense-Picoeuropeano

4.7 Sector Luciano-Ancarense

C. Región Mediterránea

Ca. Subregión Mediterránea occidental

15. Provincia Mediterránea Ibérica Occidental

15.a. Subprovincia Luso-Extrenaduriense

15.1. Sector Toledano Tagano.

15.b. Subprovincia Carpetano-Leonesa

15.3. Sector bajo Beirense

15.5 Sector Bejarano-Gredense

15.6 Sector Salmantino

15.7 Sector Estrelense

15.8 Sector Lusitano Duriense

15.9 Sector Berciano Sanabriense

15.10 Sector Leonés

La metodología usada al estudiar la vegetación en este trabajo es la llamada fitosociología integrada, que trabaja en el nivel teselar de serie de vegetación sin considerar los estados de la sucesión.

La serie de vegetación constituye en sí misma la vegetación potencial de un lugar. Hay dos tipos de series, las climáticas o climatófilas y las edafófilas. Las climáticas dependen exclusivamente de los condicionamientos climáticos como el régimen de precipitaciones, sin embargo las edafófilas dependen de condicionantes edáficos excepcionales. A la hora de definir una serie de vegetación es importante hacer referencia al piso bioclimático en el que se encuentra, a la situación biogeográfica, así como la especie dominante.

A continuación se enumeran grupos de series con sus series de vegetación climáticas que pueden encontrarse en Castilla y León según Alcaraz (1987):

- Pastizales alpinos y crioromediterráneos.
 - Serie alpina Orocantábrica-Carrionesa de *Oreochloa blanka*.
 - Serie alpina picoeuropeana de *Elyna myosuroides*.
 - Serie guadarrámica de *Festuca indigesta*.
 - Serie bejarano-gredense de *Festuca summilusitana*.
 - Serie Bercianosanabriense de *Festuca indigesta*.
 - Serie Ibérico-soriana de *Festuca indigesta*.

Figura II.5.1: Macroclimas de Europa y de bioclimas y variantes bioclimáticas de España y Portugal. Fuente: Rivas-Martínez et al 2002.

Figura II.5.3: La biogeografía de la Península Ibérica hasta el nivel de sector. Fuente: Rivas-Martínez et al 2002.

Figura II.5.4: Leyenda del mapa de la biogeografía de la Península Ibérica hasta el nivel de sector. Fuente: Rivas-Martínez et al 2002.

- Enebrales rastreros y piornales serranos subalpinos y oromediterráneos.
 - Serie subalpina orocantábrica del enebro rastrero.
 - Serie subalpina picoeuropeana del enebro rastrero.
 - Serie oromediterránea ibérico-soriana del enebro rastrero.
 - Serie oromediterránea guadarrámica del enebro rastrero.
 - Serie oromediterránea bercianosanabriense del enebro rastrero.
 - Serie oromediterránea bejaranogredense del piorno serrano.
 - Serie oromediterránea salmantina del piorno serrano.
- Hayedos montanos orocantábricos y supramediterráneos.
 - Serie ibéricosoriana del haya.
 - Serie castellanocantábrica del haya.
 - Serie luciano-ancarese, ubiñense-picoeuropeano y campurriano-carrionés del haya.
- Melojares montanos y mesosupramediterráneos.
 - Serie montana orocantábrica y galaicoasturiana.
 - Serie celtibéricoalcarreña, guadarrámica y bejaranogredense.
 - Serie bercianosanabriense y leonesa.
 - Serie ibérico-soriana y castellanocantábrica.
 - Serie bercianosanabriense y salmantina.
 - Serie lusoextremaduriense.
- Abedulares montanos y supramediterráneos.
 - Serie orocantábrica.
 - Serie bercianosanabriense y estrellense.
 - Serie guadarrámica e ibéricosoriana.
- Fresnedas climatófilas.
 - Serie orocantábrica y cantabroatlántica del fresno.
- Quejigares.
 - Serie supramediterráneacastellanocantábrica y riojana.

- Serie mesosupramediterránea castellanoduriense, celtibéricoalcarreña e ibéricosoriana.
- Sabinares albares montanos o supramediterráneos.
 - Serie orocantábrica
 - Serie celtibericoalcarreña e ibéricosoriana.
- Encinares colino-montanos y mesosupramediterráneos.
 - Serie campurrienocarrionesa y picoeuropeana.
 - Serie castellanocantábrica y riojana.
 - Serie castellanoduriense, celtibéricoalcarreño, ibéricosoriano, maesrazgo y manchega.
 - Serie salmantina, lusitanoduriense y berciano sanabriense.
 - Serie guadarrámica y bejaranogredense.
- Alcornocales mesomediterráneos.
 - Serie lusoextremaduriense.

A continuación se enumeran las series de vegetación climáticas que pueden encontrarse en Galicia según Alcaraz (1987):

- Hayedos montanos orocantábricos.
- Avellanedas montanas orocantábricas.
- Abedulares altimontanos orocantábricos.
- Melojares eurosiberianos ancarenses.
- Melojares mediterráneos bercianos.
- Melojares mediterráneos bercianosanabrienses.
- Encinares eurosiberianos ancanrenses.
- Encinares mediterráneos lusitanos.
- Carballares colinos y montanos orocatábricos y cantabroatlánticos.
- Tojal-brezales colinos y montanos Galaico asturianos y Galaico portugueses.
- Piornales colinos, montanos y supramediterráneos Galaico portugueses y Galaico asturianos.
- Jarales mesomediterráneos bercianosanabrienses.

- Enebrales montanos orocantábricos y supramediterráneos bercianosanabrienses.

Cada una de estas series representa un óptimo, pero en la realidad pueden no encontrarse en situación óptima de clímax y estar en alguna de las fases de la sucesión conformando una asociación vegetal en particular. En ocasiones alguna de estas series constituyen en sí mismas estadios sucesionales de otras series climáticas. Por ejemplo, en las series de los melojares suelen hallarse bosques degradados que dan paso a etapas sustitutivas de piornal. En otro caso la serie de los Tojal-brezales es una etapa de sustitución en carballares. Otras veces sin embargo etapas sustitutivas llegan al clímax constituyendo una serie en sí misma. El ejemplo pueden ser algunas series de piorno serrano.

Las series de vegetación representan situaciones de clímax o estado final de la sucesión, y el encontrarse en un estadio no climático puede ser debido a la acción del hombre o por propia degradación natural, un ejemplo de degradación es la provocada por los incendios que envían a la serie a alguna de las etapas iniciales.

A pesar de que algunas de las series presentadas para Castilla y León no están presentes en las provincias más occidentales objeto de estudio, como por ejemplo los sabinares albares, la alta diversidad es a considerar en las dos regiones que estamos estudiando. Sin contar con las series edafófilas vemos como la diversidad de la vegetación potencial de ambas regiones es muy alta.

Lo descrito hasta estas líneas refleja cual es la vegetación óptima de las regiones de Galicia y Castilla y León según consideraciones exclusivamente climáticas. Pero la realidad es bien distinta, sobre todo debido a la intervención del hombre en estas series de vegetación a lo largo del tiempo. Especialmente habría que destacar un aprovechamiento, la producción maderera de especies extranjeras introducidas, que en Galicia prácticamente han sido dos: *Pinus pinaster* y *Eucaliptus globulus*. Grandes extensiones de series de los carballares fueron sustituidas sobre todo en el siglo XX por estas otras especies más rentables. Los pinares y eucaliptales de los pisos colino y montano en Galicia han llegado a definirse como “disclimax” según Alcaraz (1987) en

un sentido peyorativo, por el trastorno y alteración que causan en la vegetación potencial.

En el área noroeste de la Península Ibérica existen comunidades vegetales a nivel teselar muy diferentes unas de otras desde el punto de vista específico. Si se supone que los incendios forestales son más o menos propensos según en que comunidad vegetal nos encontremos, tal y como se afirma desde algunos sectores, una alta diversidad vegetal en un área determinada indicaría que el fenómeno del fuego aparecería espacialmente de forma discontinua, y los resultados del número de incendios sin embargo nos muestran un sincronismo. Cuando el fuego aparece lo hace indiscriminadamente en cualquier tipo de formación.

El clima es el que determina la existencia de un determinado tipo de vegetación u otro. Así las zonas costeras del noroeste de la península debido a su carácter climático húmedo, y sus condicionantes térmicos, dan lugar a la aparición de series de vegetación de una alta densidad de cubierta vegetal y, por lo tanto, mayor combustible disponible para el fuego. En el oeste de Castilla y León las series de vegetación existentes debido a sus condiciones climáticas no son tan densas como las de Galicia, pero también poseen una enorme productividad vegetal.

Cuando las condiciones climáticas predominantes se rompen, y surgen otras condiciones meteorológicas de escala menor opuestas a las climáticas, la vegetación se encuentra transitoriamente ante una situación que no le es favorecedora, hallándose en situación de estrés (Por ejemplo si en Galicia irrumpen condiciones más propias de otras áreas bioclimáticas mediterráneas, su vegetación eurosiberiana templada no se encuentra en sus condiciones óptimas). Es justo en estas situaciones donde los incendios acontecen con mayor virulencia. Aspecto que será estudiado en esta tesis (“efecto dipolar”).

El mismo razonamiento hecho anteriormente puede trasladarse a cualquier área costera de la península. Las comunidades vegetales de las áreas costeras son más sensibles a este efecto debido a la enorme variación que pueden sufrir sus condiciones dependiendo de donde procedan las masas de aire a escala meteorológica. Desde luego que esas

condiciones de estrés no son las más comunes en las áreas costeras, pero cuando se dan el fuego aparece.

Niveles por debajo de lo normal en la humedad atmosférica mantenidos durante un periodo de tiempo a escala meso (varios días), pueden favorecer la pérdida de agua en la vegetación por evapotranspiración, entrando en una situación de estrés hídrico y siendo más susceptible de ser inflamada en un incendio.

La vegetación edafófila no dependiente de los condicionamientos climáticos, no se ve afectada en su contenido de humedad, ni entran en estrés hídrico si no existe una reducción en el agua disponible en el suelo. La vegetación edafófila es difícil que se vea afectada por los incendios si no hay desequilibrios hídricos edáficos o freáticos.

La vegetación climatófila, al depender más de las condiciones ambientales, es más vulnerable al estrés hídrico y a la pérdida de agua cuando sequedad atmosférica es dominante.

CAPÍTULO III:

LA LUCHA ANTIFUEGO

Desde un punto de vista social el problema del fuego constituye un proceso de pérdidas materiales y, en el peor de los casos, de vidas humanas. Por esta razón todo gobierno considera este problema como un aspecto a cubrir por un diseño de estrategia de lucha. Una estrategia, que puede ser de variados tipos, comprende varios pasos: prevención, predicción y lucha operativa

III.1. Estadísticas: comentarios

En la lucha antifuego se hace indispensable el manejo de una buena información para poder afrontar el problema. Por ejemplo una información muy apreciada entre los organismos gestores son los resultados sobre el estudio de las causas. Pero la escasez de información a cerca de las causas de los incendios, genera una enorme dificultad en las campañas preventivas, y además favorece la extensión de falsedades y bulos entre la población, provocando mucha confusión.

La búsqueda de las causas de los incendios es, y ha sido, uno de las tareas más desarrolladas en el entorno de los eventos de fuego. Sobre todo las causas de origen antropogénico han sido las más investigadas en los últimos años. Las técnicas de detección de las causas después de haberse producido un incendio han avanzado mucho. Además, las administraciones competentes han formado y dotado cuerpos especializados en este tipo de investigaciones, que son capaces a posteriori del incendio, de hallar el foco inicial de un fuego, e incluso analizar que las causas sean fortuitas o intencionadas. Pero estas causas sólo pueden conocerse una vez iniciado el incendio.

La metodología de las evidencias físicas que usan las brigadas de investigación de incendios forestales fue puesta en práctica por primera vez en Estados Unidos. Esta metodología comenzó a ser aplicada en Europa, primero en Portugal hace más de 20 años, y posteriormente llegó hasta España. El principio básico de esta materia es la colaboración interdisciplinar, donde los conocimientos forestal y policial van íntimamente unidos para conseguir el esclarecimiento de las causas que originaron el incendio.

La rapidez de actuación y la observación del terreno son las claves de la metodología a aplicar. Lo primero que hace el equipo de investigación es acotar la zona de inicio del incendio y después comienzan un análisis de las evidencias físicas resultantes del incendio, (geometría, meteorología, vestigios de dirección de paso del fuego, rastreo de área de inicio, vestigios del medio de ignición, etc) y un análisis de evidencias de actividades humanas, junto con la recogida y análisis de información de testimonios que

finalmente permitirán llegar a determinar la causa del incendio. En España esta técnica aún está en fase inicial, pero son varias las Comunidades Autónomas que ya tienen brigadas de investigación de incendios forestales entre sus agentes. Valencia, Cataluña, Castilla y León, Andalucía son algunas de ellas.

Toda esta información a cerca de las causas debe ser recogida, junto con el resto de la información sobre el incendio recopilada por los agentes, en un modelo general de parte de incendio forestal de recogida de datos para la Estadística General de Incendios Forestales (EGIF).

El conocimiento de cuáles y cómo se produjeron las causas del fuego es de utilidad en las medidas preventivas en primer lugar, para evitar que se produzcan de nuevo, y en segundo lugar para aplicar la normativa administrativa o penal vigente a los presuntos sospechosos que resulten de la investigación policial, en los procesos judiciales como pruebas del delito.

En el senado español fue creada la Comisión Nacional de Protección de la Naturaleza a través de la Ley de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres de 27 de marzo de 1989. Se trata de un órgano consultivo de cooperación y coordinación entre el Estado y las Comunidades Autónomas. En el seno de dicha comisión se constituyó el Comité de Lucha Contra los Incendios Forestales (CLIF). El CLIF es uno de los cinco comités especializados adscritos a la Comisión Nacional de Protección de la Naturaleza junto con el Comité de Espacios Naturales Protegidos, el Comité de Flora y Fauna Silvestres, el Comité de Humedales y el Comité de Mejora y Conservación de Recursos Genéticos Forestales. El CLIF, que concretamente se creó en el año 1994, está compuesto por un representante de cada comunidad autónoma, un representante del Ministerio de Medio Ambiente y un representante de la Dirección General para la Biodiversidad, que ejerce su presidencia, y se reúne con carácter ordinario dos veces al año, normalmente en los meses de abril y septiembre. Los asuntos tratados en ambas reuniones van desde el balance de la campaña de extinción de incendios forestales de invierno, pasando por la evaluación de la actuación de los Equipos de Prevención Integral contra Incendios Forestales (EPRIF), creados por el Ministerio de Medio Ambiente, hasta analizar los problemas encontrados y los resultados de la campaña de extinción de incendios de verano.

El CLIF recientemente encargó un estudio estadístico que consistió en entrevistar a todos los agentes implicados en los incendios forestales así como los resultados de los

partes de los incendios producidos, y se pudieron extraer una serie de conclusiones a cerca de las causas de los incendios:

- El rayo y otras causas fortuitas son entre un 3 y 5%.
- Un 15 % a causa de negligencias.
- Un 60 % causas intencionadas.
- Un 20 % causas de los incendios desconocidas.

Rayos

El rayo y otras causas fortuitas vienen a provocar entre 3 y 5% de los incendios forestales. Variando mucho de unas regiones a otras. Normalmente acontecen en situaciones de tormenta seca. Las consecuencias pueden ser graves, puesto que, al comenzar una tormenta, normalmente la alerta de los medios de vigilancia y extinción antifuego se reduce o cesa, pero afortunadamente es un fenómeno que se da en pocas ocasiones. Rivas et al. (2001a, 2001b, 2001c) demuestran que la mayoría de las descargas nube tierra, que son las susceptibles de provocar incendios, suelen acontecer en días inestables húmedos. Días en principio de un bajo riesgo de fuego. Sólo si las condiciones excepcionales son tales que no exista precipitación en superficie (tormenta seca) existirá un riesgo de incendio por rayo.

Rorig y Ferguson (2002) analizan como la inestabilidad húmeda unido a la ausencia de precipitación en superficie puede dar lugar a un rayo capaz de iniciar un fuego. Es necesario detectar, por lo tanto, no sólo los días de inestabilidad húmeda, como realizan muchos índices, sino también la sequedad en superficie como la que puede existir durante una tormenta es seca.

Gisborne (1931) halló que el principal factor que determinaba la aparición del fuego es la duración de la precipitación existente durante una tormenta eléctrica. Sus investigaciones han demostrado que sólo entre un 6 y un 10 % de las tormentas eléctricas pueden denominarse secas estrictamente. A pesar de ese bajo porcentaje debe tenerse en cuenta este tipo de distinción entre tormenta seca y tormenta húmeda.

En una situación propia de tormenta seca es necesaria una inestabilidad de la columna y una cierta humedad en altura que favorezcan el desarrollo convectivo, pero la principal característica es el alto poder desecante entre la base del cúmulo y la superficie. Ello hace que en superficie no exista precipitación y que el contenido de humedad de los combustibles sea muy bajo. En estas condiciones un rayo nube tierra se convierte en un potencial causante natural de incendio. En el capítulo X de esta tesis estas situaciones

serán incluidas, explicando extensamente los criterios para discernir los días de tormenta seca y tormenta húmeda desde un punto de vista físico atmosférico.

Existen mapas actualizados de la península en los que se presentan las localizaciones de los rayos nube-tierra con un error menor a 8 km. Así el Instituto Nacional de Meteorología en su página web presenta las localizaciones de las descargas nube-tierra tanto positivas como negativas de las últimas 24 horas. Cada uno de los puntos definidos pueden ser susceptibles de inicio de un foco de incendios si las condiciones de humedad en superficie son las propias de una tormenta seca. La localización se consigue con mucha precisión espacial mediante métodos de triangulación. El sistema de detección utilizado en España es el modelo ALDF 141-T, similar al utilizado en otros países. Es un sistema de banda ancha de antenas capaces de detectar los campos electromagnéticos generados por las descargas nube-tierra. Decir que este sistema de localización ignora los rayos nube-nube mucho más frecuentes pero responsables de escasos daños.

Existe una red de 13 sensores por la península que son capaces de detectar la distancia a la que ha caído un rayo. Sólo necesitamos el dato de tres sensores para localizar el punto exacto por triangulación, alcanzándose en este tipo de sistemas, una eficiencia del 70 %. Esta información puede ser muy útil en la labor de vigilancia porque si se aporta de forma inmediata a los gestores, el punto aproximado de localización de un potencial foco de incendio puede ponerse en conocimiento de los medios de extinción prácticamente a tiempo real, poniendo especial atención en aquellos días de tormenta seca.

Además del bajo % de incendios causados por rayo, su detección puede ser inmediata utilizando sistemas de detección, luego si estos medios son utilizados, los rayos no deben constituir un factor causal sorpresivo a efectos de gestión.

El valor predictivo de los sistemas de localización es nulo puesto que cuando se detectan las descargas ya se han producido y no puede predecirse dónde caerá el próximo rayo. En cambio los días de posible tormenta seca sí pueden predecirse y en ese caso el sistema de localización de descargas sirve para centrar el área de vigilancia y actuación de los medios en los momentos iniciales de un fuego, justo donde se localice la descarga en tierra.

Negligencias

Un 15 % de los incendios son a causa de negligencias. Un uso inadecuado del fuego puede dar lugar a la provocación de un incendio descontrolado. Por ejemplo la roturación para conseguir terrenos agrícolas, la quema de pastos y matorral, los trabajos forestales, los incendios que se daban por extinguidos y que se reproducen, hogueras, quema de basuras, y fuga de vertederos, son algunas de las acciones que dan lugar a este tipo de negligencias. La mayoría de estas quemas están reglamentadas en las Comunidades Autónomas españolas, es decir, que pidiendo un permiso pueden hacerse quemas controladas. Pero en muchas ocasiones en las áreas rurales, o no se cumple la reglamentación, o más bien no se aplican correctamente las medidas de precaución necesarias y exigibles en el permiso de quema. Cuando esto sucede puede darse origen a un incendio forestal. El permiso trata de evitar las negligencias pero no siempre lo consigue. Aunque hay quema de pastos y matorrales reglamentadas, los incumplimientos son muy frecuentes. Existen dos razones que hacen que este uso tradicional del fuego se vuelva más peligroso: La enorme acumulación de combustibles por el abandono de tierras y el envejecimiento de la población que posee menos capacidad de manejo del fuego como herramienta tradicional.

Intencionados

Un 60 % de los incendios tienen una causa intencionada. Suelen venir producidas por quemas de pastos, agrícolas, rastrojos, y en otras ocasiones venganzas, vandalismo o incluso por patología psíquica. En la figura III.1.1 y III.1.2 podemos observar las motivaciones de los incendios intencionados acontecidos en España durante el año 1998 y 2002 respectivamente según dos fuentes: la Base de Datos de Incendios Forestales proporcionada por el Ministerio de Medio Ambiente y Adena. La quema de pastos y la quema agrícola son las dos principales motivaciones en ambos casos. La diferencia de estas, con las propias de una carácter negligente, es que en el caso de ser intencionado no existe voluntad por controlarlo, ni extinguirlo, ni solicitar, ni cumplir las exigencias ni limitaciones expresadas en los permisos de quema. La negligencia en cambio conlleva una voluntad de control pero el incendio se produce por accidente.

En otras ocasiones, como ocurre en algunas regiones de Noroeste de la Península, los incendios intencionados surgen fruto de conflictos generados por las repoblaciones forestales. Antes, dieron en los años 40 y 50 mucho trabajo en la zona, pero en la actualidad no existe esa situación, y ha derivado a un malestar con la administración, y entre unas parroquias y otras.

También sucede en algunas zonas de España, que al declararse un Espacio Protegido, la falta de información genera desconfianza en la población, y las restricciones provocan malestar y un resentimiento hacia la administración. Algunos ciudadanos responden incendiando el bosque.

Otras motivaciones menos frecuentes son por conflictos debidos a la caza, furtivismo, cambio del uso del suelo, contrabando, mercado de la madera, urbanismo, mercado de trabajo para cuadrillas forestales, etc.

Los estudios estadísticos permiten establecer tres grandes grupos de motivaciones para las causas intencionadas: Incendios provocados por perturbados mentales (pirómanos patológicos), incendios provocados por razones políticas, e incendios provocados por razones socioeconómicas. La piromanía es una enfermedad poco frecuente y su relación con el fenómeno de los incendios forestales es pequeña. Aunque se hayan detectado, el porcentaje no es mayoritario (entre un 20-15 % de los intencionados) en la enorme cantidad de incendios que se producen cada año en regiones como, por ejemplo, Galicia. Las razones políticas pueden existir también en algunos casos pero todo indica a que las principales motivaciones son socioeconómicas, tal y como puede observarse en los resultados de las figuras III.1.1. y III.1.2.

Figura III.1.1: Motivaciones de los incendios intencionados del año 1998 según la base de datos de incendios forestales. Fuente Vélez (2000)

Los incendiarios actúan con un fin premeditado y tratan de tener éxito en su acometido para obtener algún tipo de beneficio socioeconómico. Para ello buscan las situaciones más favorables para que el fuego se inicie y progrese según experiencias pasadas, por

eso tienden a intentarlo en días meteorológicamente favorables al fuego, y a una hora en el que los incendios progresen con facilidad. Saber las condiciones de fuego favorables con una predicción puede resultar de mucha utilidad porque es posible adelantarse a los incendiarios en su intención de provocar un incendio, y aumentar así la vigilancia. Predecir el tiempo de fuego es predecir intencionalidad incendiaria.

Figura III.1.2: Motivaciones de los incendios intencionados del año 2002 según la base de datos de incendios forestales. WWW/Adena (2004).

Un ejemplo de motivación socioeconómica es la comentada con anterioridad sobre las regiones del noroeste de España dónde se realizaron repoblaciones por la administración y que generaron conflictos locales, ya que por una parte muchos particulares se vieron beneficiados por la rentabilidad de sus tierras al repoblarlas, pero por otro lado, muchas tierras que eran comunales y de aprovechamiento ganadero, fueron también repobladas y su uso ganadero cesó. El conflicto entre unas entidades locales y otras está servido por los perjuicios económicos que surgieron en la etapa posterior a la repoblación.

Desconocidos

Un 20 % de las causas de los incendios no llegan nunca a conocerse lo cual constituye una cantidad considerable de incendios, por ejemplo, en regiones donde se producen año tras año un elevado número de ellos. Tal es el caso de Galicia en el noroeste de la Península Ibérica. Que un porcentaje tan considerable de incendios no pueda ser esclarecido implica que en las labores de prevención un gran número de causas no sean tenidas en cuenta.

Por otro lado, debemos de considerar que en la actualidad, y con tendencia a aumentar, existen cada vez más causas posibles de incendio dado el desarrollo de la sociedad, y que esas nuevas causas, junto con las ya existentes de forma tradicional, cada vez están más en contacto con los potenciales combustibles. Esto hace que el trabajo de investigación se complique y sea difícil aumentar el porcentaje de causas conocidas.

Tratar de mejorar la metodología de detección de las causas sería una solución para reducir este porcentaje. La información resultante podría entonces aplicarse de forma más eficaz en las labores preventivas para evitar que esas causas vuelvan a producirse.

A pesar de que la metodología ha logrado un rendimiento del 80 % en el esclarecimiento de las causas, y de que dicha información ha sido aplicada en la prevención de años posteriores, no se ha traducido en una tendencia a disminuir el número de incendios. En el periodo 1998-2005 en Galicia la media de los incendios anuales se han situado en 5420, muy por encima de la media del periodo 1988-1998 en el que la media de incendios anuales fue 4906 en Galicia. La tendencia ha sido clara al aumento del número de incendios.

Esto nos debe de hacer reflexionar a cerca de si la investigación de las causas de los incendios que se producen en una región verdaderamente ayudan a que se reduzcan las cifras. Nadie duda que el conocimiento de las causas del fuego es una información importante y necesaria, pero su utilidad parece más dirigida a la búsqueda de responsables que a una labor preventiva en sí misma. No obstante todo lo que se haga en este sentido será positivo en la lucha contra el fuego.

Dado el número de incendios de causa desconocida, y la escasa utilidad que tiene a efectos de prevención el conocer las causas, todo apunta a que es más lógico estudiar cuales son las condiciones más favorables al fuego que hacen a las causas ser efectivas, sean éstas cuales fueren.

A partir de la información de las base de datos de EGIF, que se nutre de los partes de incendios elaborados en las diferentes Comunidades Autónomas, también se han obtenido los porcentajes de causas de incendios de las diferentes autonomías del Estado español. Los resultados son mostrados en la tabla III.1.1

De los datos de la presente tabla podríamos destacar la gran importancia de los rayos como causa de fuego en comunidades autónomas como Aragón y Castilla – La Mancha, y la influencia de las quemas agrícolas en regiones como Castilla y León, Extremadura, Galicia y Asturias.

Pero lo más destacado sin duda es el alto número de incendios por causa desconocida en la mayoría de comunidades. Los datos sobre el porcentaje de causa desconocida que se observaron para toda España son confirmados ahora autonomía a autonomía. Vemos como Galicia se encuentra en torno a la media Española con un 21,2 % de causas desconocidas. Destacaría el 37,1 % de Castilla y León muy por encima de la media estatal, y superando al porcentaje recogido en Galicia. Por lo tanto, en Castilla y León son aún menos conocidas las causas de incendios, y ello se traduce en una menor eficacia de su uso en labores de prevención.

Tabla III.1.1: Causas de Incendios (%) según los datos de la Estadística General de Incendios Forestales de España. Años 1989-1995. Fuente Vélez (2000)

C.A.	%	Negligencias y Otras		Intencionado		Desconocidas
		Quemas agrícolas y Pastos	Varias	Quemas agrícolas y Pastos	Criminales	
Andalucía	2.6	7.8	18.6	17.2	14.0	39.8
Aragón	38.0	16.9	16.8	2.5	1.4	24.4
Asturias	0.9	6.4	3.0	25.3	22.9	41.5
Baleares	4.4	8.2	36.9	7.7	20.7	22.1
Canarias	0.7	6.4	14.2	6.6	22.1	50.0
Cantabria	0.3	0.9	1.2	72.4	13.6	11.6
Cast.Mancha	29.4	11.5	19.9	9.5	6.0	23.7
Cast.y León	7.1	10.1	8.9	32.5	4.3	37.1
Cataluña	8.3	14.4	36.8	3.8	13.4	23.3
Extremadura	3.9	3.8	9.8	30.5	5.9	46.1
Galicia	1.1	1.4	4	23.7	49.1	21.2
Madrid	2.1	0.8	7.7	1.9	3.8	83.7
Murcia	10.0	9.1	20	12.1	0.0	48.8
Navarra	3.6	21.1	7.3	6.0	0.3	61.7
La Rioja	5.9	21.9	12.9	39.5	1.6	18.2
País Vasco	1.7	9.6	20.1	25.8	12.1	30.7
C.Valenciana	11.9	15.4	22.9	10.6	13.3	25.9

En la revisión bibliográfica vimos que existen métodos para hallar la probabilidad de que un incendio se produzca por causa antrópica, pero en definitiva, ésta depende del estado de la atmósfera. Las causas son algo muy difícil de prever, y podemos decir que las causas, sean las que sean, siempre están presentes, y son las adecuadas condiciones las que favorecen que definitivamente dichas causas finalmente sean efectivas o no. Esas adecuadas condiciones, a nuestro juicio, y coincidiendo con otros autores, son las meteorológicamente favorables al fuego.

Estas condiciones favorables serán suficientemente explicadas en esta tesis, y como veremos, se ciñen a la situación del estado de la columna atmosférica y no a parámetros puntuales de superficie como la temperatura. Autores como Vélez (2000) afirman:

“ La distribución mensual de los incendios desmiente que la causa principal de los mismos sean las altas temperaturas. Las condiciones meteorológicas favorecen su propagación, pero no lo inician. El número de incendios en febrero-marzo, con fuertes heladas nocturnas, no impide un alto número de incendios en provincias como Burgos, Palencia, Zamora o León”.

En un trabajo anterior realizado por este equipo investigador fue demostrado el sincronismo estacional existente en el noroeste de la Península Ibérica existiendo dos máximos de incendios, uno en agosto y otro en febrero-marzo, no encontrándose una correlación con la evolución unimodal anual de la temperatura. La primera y la última frase de la afirmación de Vélez coincide con aquellas conclusiones. La aparición del fuego no depende de la temperatura en superficie. Las condiciones meteorológicas, a nuestro juicio, influyen tanto en el inicio como en la propagación, y no estaríamos hablando de la temperatura en superficie sino de otros parámetros en altura. Vélez dice que la temperatura en superficie no es causa de incendios en invierno y, por lo tanto, concluye que las condiciones meteorológicas no influyen en el inicio de un fuego en esa época del año, pero no está teniendo en cuenta que otras condiciones, a parte de la temperatura superficial, juegan un importante papel.

III.1.1. Impacto causado por los incendios

Los incendios forestales han entrado a formar parte de la problemática ambiental debido a las consecuencias negativas medioambientales y sociales que pueden tener, y a que se ha observado un aumento en número en los últimos años a nivel mundial. Es conocido, por otra parte, que el fuego ha sido utilizado por el hombre a lo largo de la historia para roturar terrenos, pastoreo, caza, etc, y que ello aumentó los incendios y modificó el paisaje. Pero ese uso cultural del fuego a lo largo de miles de años, había alcanzado un cierto equilibrio mientras la actividad del ser humano era eminentemente agrícola y ganadera. Paisajes como la dehesa, sotos, praderas, poseen una intervención cultural del hombre y, constituyen en sí, elementos del paisaje perfectamente sostenibles. Actualmente la incidencia que el hombre ejerce en el incremento de incendios forestales puede llegar a ser más alta que en tiempos pretéritos a causa de acciones como la intrusión urbanística, el aumento de las causas de ignición o la pasividad ante las masas forestales. La razón más lógica del aumento del número de incendios es sin duda una cuestión de desarrollo. Son los países más desarrollados los que más están sufriendo el problema del fuego.

Autores como Vélez (2000) afirman: *“Aunque no existen buenos datos acerca del número y tipo de incendios que ocurrieron en el pasado en nuestro entorno, todo parece indicar que, durante las últimas décadas, se ha producido un cambio sustancial en la ocurrencia de incendios en España y otros países de la cuenca mediterránea”*. *“Los países más desarrollados de la cuenca mediterránea experimentaron un aumento sustancial en el número de incendios”*. *“ El hecho de que la mayor incidencia se dé en los países industrializados del Norte, y no del Sur del Mediterráneo, independientemente de las condiciones climáticas reinantes, indica que las causas responsables de semejante cambio han debido ser diferentes a las de tipo climático, al ser éstas comunes a uno y otro lado del mar”*.

Este aumento en los eventos de fuego trae consigo un aumento de los impactos negativos.

En muchos ecosistemas, como los bosques boreales, los incendios han realizado una labor puramente ecológica como mecanismo natural de regeneración. Los incendios han participado allí como actores de este sistema durante millones de años. El fuego es necesario para que el bosque boreal siga su ciclo. Muchas especies (*Pirofitos*) han sido capaces de adaptarse a él hasta el punto de hacerse dependientes en su ciclo biológico.

El bosque se regenera continuamente gracias a la herramienta natural de defensa que supone el fuego. El fuego en esos bosques forma parte del ecosistema y, por lo tanto, no se ve como una fuerza destructora.

En cambio en los bosques de latitudes más bajas como las mediterráneas, el fuego supone un mayor problema por la menor adaptabilidad de sus especies al fuego. Quizás sólo pudieran compararse con los bosques boreales algunas masas de bosques eurosiberianos de nuestras latitudes, pero de partida las diferencias entre los bosques boreales y los que existen en la Península Ibérica son notables.

Para evaluar los efectos de los incendios silvestres en el ecosistema podrían analizarse de forma particular cada uno de los subsistemas en el que ejercerían impacto. Ya hemos comentado que existen algunos tipos de bosques en los que los incendios pueden tener un impacto positivo, pero la mayor parte tienen lugar en masas forestales donde las consecuencias son en su mayoría negativas.

Los incendios pueden causar impactos sobre el medio físico y biológico. Para comenzar el análisis evaluaremos cuales son los efectos en la atmósfera.

Posteriormente a la ocurrencia de un incendio, un área afectada de microescala (de varios kilómetros), se convierte en una zona más homogénea y puede sufrir alteraciones en sus regímenes de vientos, radiación absorbida, evaporación etc. Eso puede traer variaciones microclimáticas de pequeña escala.

Los incendios forestales son fuentes conocidas de emisión a la atmósfera. Los principales contaminantes emitidos durante un fuego son el CO₂, vapor de agua, compuestos orgánicos volátiles, partículas, entre otros. Este tipo de fuentes de emisión no es permanente en el espacio y en el tiempo como sí puede suceder con otras fuentes, como, por ejemplo, las de origen humano. Además abarcan áreas extensas de difícil medición, control y seguimiento. Existen mecanismos de estimación de estas emisiones, como los vistos en bibliografía, por medio de teledetección a partir del área quemada, pero siempre a posteriori de haberse producido el incendio. El monitoreo de las emisiones producidas durante un incendio puede llegar a ser interesante para valorar sus consecuencias a efectos de cuotas de emisión de CO₂, por ejemplo.

Es bien conocido que el CO₂ es un gas invernadero y su exceso en la atmósfera puede favorecer el calentamiento global del planeta. Esta cuestión será convenientemente expuesta en el epílogo de esta tesis. A la hora de valorar el calentamiento global deben tenerse en cuenta además de las emisiones de CO₂ de tipo antropogénico y natural las debidas a los incendios forestales. Aumentar la concentración de CO₂ en la atmósfera

por cualquier fuente, incluida la de los incendios, puede tener consecuencias en un aumento de temperatura por efecto invernadero. Los incendios van en aumento debido a causas de desarrollo humano y ello puede tener consecuencias en el aumento de las emisiones de CO₂. El objetivo de los informes del IPCC es tratar de reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, por lo tanto, en esa tarea también se encontraría la reducción de una fuente como son los incendios. Prevenir y reducir los incendios tiene un doble efecto positivo, porque no sólo disminuirá las emisiones, sino que también se mantendrá uno de los principales sumideros de carbono (las masas boscosas se encuentren donde se encuentren), que se encargan de captar CO₂ y fijarlo en estructuras biológicas con tiempos de residencia elevados.

Otra de las importantes emisiones en los incendios son las de vapor de agua, a las que habría que unir las provenientes de fuentes antropogénicas y naturales. Son emisiones no muy tenidas en cuenta, pero la labor del vapor de agua en la atmósfera puede influir en multitud de procesos, tanto negativamente como positivamente. Para empezar, como el vapor de agua es un gas de efecto invernadero, capaz de absorber radiación del rango del infrarrojo y otros rangos más energéticos, el papel que juega en el efecto invernadero es importante, no sólo por esas características de absorción, sino por su elevada concentración en la atmósfera, superando con mucho a la concentración de CO₂. Luego debería tenerse en cuenta al valorar el calentamiento global.

Otros procesos en los que participa el vapor de agua son los de transporte de energía en forma de calor latente entre unas zonas y otras del planeta pudiendo influir en la distribución de calor en la atmósfera. Por otro lado, al existir más vapor de agua la atmósfera tiene más humedad y se pueden producir más fenómenos meteorológicos del tipo de nieblas, nubosidad, precipitaciones etc, que pueden tener impactos en el medio humano y la vegetación, y desajustes del balance radiativo.

Además es curioso el efecto que puede ejercer el vapor de agua sobre el riesgo de fuego. Si hay más humedad en la atmósfera el riesgo de fuego puede verse inhibido considerablemente y, por lo tanto, reducirse las emisiones de vapor de agua causadas por los incendios. A la larga el efecto del aumento de la humedad en un hipotético calentamiento o proliferación de focos de emisión vapor reduciría la posibilidad de fuego.

El vapor de agua juega un papel muy complejo en el sistema atmosférico y se trata de un gas que necesita ser estudiado en más profundidad para conocer cual es su función exacta y como puede influir en todos los procesos que en la atmósfera tienen lugar.

Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles y de partículas tienen un efecto negativo sobre los seres vivos y, por consiguiente, sobre la población humana. Son bien conocidas las nubes contaminantes generadas por los incendios en el sudeste asiático y de los daños respiratorios que pueden causar en el ser humano. Las partículas respirables, especialmente las más pequeñas, pueden originar problemas en el ser humano, y existen algunos compuestos orgánicos volátiles que pueden tener terribles consecuencias en seres vivos. Los benzopirenos y dioxinas, por ejemplo, pueden tener acción carcinogénica o como disruptores hormonales. Afortunadamente las concentraciones de este tipo de compuestos emitidos por los incendios no es muy alta, y rápidamente precipitan, o son dispersados en la atmósfera.

Los contaminantes emitidos por incendios no sólo impactan en el entorno más próximo al fuego, pueden recorrer miles de kilómetros y afectar a otras regiones muy distantes. Por ejemplo, emisiones de incendios acontecidos en Siberia tienen un impacto en la atmósfera de Japón.

Los impactos que los incendios forestales puede ejercer sobre la hidrología son básicamente los referidos al balance hídrico del suelo y las variaciones en los regímenes de escorrentía por pérdida de cubierta vegetal. Consideraremos sólo las aguas continentales.

Cuando un incendio se produce en un área lo primero que se observa es una pérdida de la cubierta vegetal. La cubierta vegetal cumple una función muy importante en la dinámica hídrica ya que reduce la escorrentía superficial y favorece la absorción de agua en el suelo. Además el aporte continuo de materia orgánica al suelo, por medio de la hojarasca y restos vegetales, hace que la capacidad de retención de agua sea aún mayor. Cuando la cubierta vegetal desaparece a causa de un incendio, el agua de precipitación alcanza velocidades de escorrentía superficial muy elevadas y apenas existe escorrentía subterránea. Esto puede dar lugar a reducción de agua en acuíferos y a la inundación de áreas de vaguada que recogen toda la escorrentía superficial. La disminución de los acuíferos modifica el régimen hídrico de la zona y pueden desaparecer muchos manantiales, charcas y lagunas. Si las precipitaciones son muy intensas las inundaciones en superficie pueden ser muy extremas con altas velocidades de escorrentía.

La evaporación en la superficie de un suelo sin vegetación es más intensa y rápida lo cual agrava aún más el problema de la absorción del agua en el suelo.

Al no haber vegetación la transpiración no tiene lugar luego, por ese mecanismo, no se pierde agua. El aporte lento y continuo de humedad del subsuelo al entorno a través de las plantas tampoco tendrá lugar pudiendo reduciéndose el contenido de agua en el aire a escala local y reducirse la llamada precipitación oculta (por ejemplo el rocío). Estos efectos pueden acelerar la desertización y el predominio de plantas xerófilas.

Los impactos sobre la hidrología influyen directamente en la erosión del suelo. Al existir escorrentías superficiales mayores en un suelo desnudo, la pérdida de nutrientes como el nitrógeno y de los horizontes superficiales va a ser muy alta. Eso reducirá la capacidad productiva de los suelos dificultando la regeneración de la vegetación. Los suelos forestales suelen ser de poca potencia y la roca madre suele estar a poca profundidad. Una excesiva erosión puede hacer desaparecer el suelo por completo y dejar al descubierto la roca madre, lo que va a dificultar aun más la regeneración vegetal desde los estadios iniciales de la sucesión. Los materiales erosionados van a ser depositados en las zonas de depresión pudiendo colmatar lagunas y charcas. La erosión también aumenta la desertización. No podemos omitir además la existencia de los llamados incendios subterráneos que transcurren bajo la superficie en turberas o horizontes orgánicos. Estos suelos quedan alterados en su estructura y composición por ese tipo de incendios.

El primer impacto que se produce en la biosfera durante un incendio es la pérdida de la cubierta vegetal. Los incendios pueden reducir no sólo la biomasa vegetal de un bosque, sino también, reducir o incluso eliminar especies endémicas del lugar que posean un valor en la riqueza en biodiversidad en la zona. Eso suele suceder sobre todo en los incendios de gran extensión que pueden afectar a áreas amplias con características biogeográficas propias. Los hongos hipógeos simbiotes de las plantas desaparecerán y detrás del incendio predominarán las especies saprofitas hasta que la vegetación vuelva a regenerarse. Al verse afectada la vegetación el impacto en el resto de los seres vivos que habitan en esos nichos va a ser alta, porque esos nichos proporcionados por las vegetación van a desaparecer. Por ejemplo muchas aves perderán su áreas de nidificación, muchos mamíferos herbívoros tendrán que desplazarse y con ellos sus depredadores. La enorme cantidad de microfauna e insectos que habita en el suelo del bosque y que se alimenta de materia vegetal viva desaparecerá, y con ellos las diferentes relaciones ecológicas que pueden tener con otros organismos (polinización de plantas

por insectos). La Herpetofauna sufre un enorme impacto por la incapacidad de huir y la desaparición de sus refugios y alimento.

Puede suceder que la cubierta vegetal no sea calcinada en su totalidad y que los pies permanezcan vivos. En esos casos la vegetación quedará debilitada y más expuesta a enfermedades.

Un incendio forestal reduce la biodiversidad de una zona hasta que la regeneración de la vegetación la recupere de forma progresiva. Si no existe un apoyo para que estas áreas se regeneren el problema ambiental es inminente. Pero estas medidas son a posteriori. Las medidas más adecuadas serían las tomadas a priori del incendio, para no esperar a que el daño se produzca. Esas medidas serían: una buena prevención y un buen mecanismo de predicción de incendios, que permita a los gestores estar preparados para minimizar estos impactos.

Existen metodologías para la valorar económicamente el daño que producen los incendios silvestres. Pero como sucede en muchas ocasiones en la valoración económica del medio ambiente existen daños intangibles de difícil valoración y que requieren de un análisis subjetivo humano no materializable en términos monetarios. Muchos de los daños producidos en el medio físico y biológico son difíciles de valorar. Quizás las pérdidas en el medio socioeconómico sean más sencillas de expresar en términos económicos.

El ser humano desde sus orígenes ha dependido fuertemente de las masas de cubierta vegetal para su subsistencia, no sólo porque era el medio en el que en gran parte de las ocasiones se hallaban sus fuentes de alimento, sino porque extraían gran cantidad de recursos como la madera, leña, carbón vegetal, etc.

Actualmente con el desarrollo urbanístico y el uso de los combustibles fósiles las masas forestales han tomado un cariz muy distinto del que tuvieron con nuestros antepasados. Algunos bosques actualmente son mantenidos en la mayoría de los casos por la producción económica que se extrae de ellos. Principalmente el beneficio es el maderero, pero también existen otros recursos aprovechables de rentabilidad económica como los recursos micológicos, frutos, leña, etc.

En general el interés cultural de la sociedad por este tipo de formaciones boscosas es reducido, y se mantienen por la administración por su valor ecológico como áreas recreativas y de ocio; y por los titulares particulares por producción maderera, frutos, hongos, leña, etc. Esta reducción del interés cultural a nivel global ha hecho que los

bosques cada vez sean menos trabajados y menos explotados encontrándose en un estado de abandono.

La aparición de incendios en las masas de producción maderera pueden tener efectos muy negativos sobre la economía local de algunas zonas ya que muchas actividades directas e indirectas como serrerías, fabricas, etc, dependen de un suministro de materia prima que, con un incendio, se vería terriblemente afectado en su cantidad y calidad. En todo caso, sea cual sea el tipo de masa forestal y la producción que la población local extraiga de ella para su beneficio económico, un incendio siempre va a causar impactos muy negativos en la población local.

Por eso, como vimos en el apartado de la legislación existen ayudas post-incendio por parte de las administraciones para recuperar la economía de esas poblaciones.

Ahora, cada vez más, está surgiendo un nuevo impacto en el medio socioeconómico como es el daño a los bienes materiales. Debido a que las zonas urbanas cada vez se encuentran más en el seno de masas boscosas (urbanizaciones, complejos residenciales, etc), cuando el fuego aparece en estas zonas de interfase, gran cantidad de daños materiales son producidos en los inmuebles que quedan en ocasiones completamente arrasados por el fuego, como ha podido comprobarse en los diferentes episodios de incendios de Los Ángeles (California). Es un impacto que cada vez se tendrá más en cuenta y que ya trasciende a niveles fuera de los exclusivamente económicos, con efectos demográficos y sociales. Este tipo de daños en la población urbana suelen ser muy elevados y las ayudas establecidas por ley, por lo tanto, también deben serlo, eso encarecerá los presupuestos de las administraciones en ayudas. Esta es una razón más para tratar de reducir los incendios y sus efectos.

Para minimizar los impactos en el medio socioeconómico una buena gestión es primordial, y ella debe de incluir no sólo la prevención sino también una adecuada respuesta ante los eventos de fuego, la cual será más eficaz si existe un método que sea capaz de predecir los incendios. En este trabajo serán estudiados los métodos que nos permitan predecir el tiempo de fuego.

Otro tipo de medidas serían de ordenación del territorio, que reduzcan los impactos en los bienes materiales, y que deben ser también tenidas en cuenta sobre todo en las zonas de interfaz.

III.2. Gestión de Incendios

III.2.1. Prevención

Una de las líneas en la gestión de la lucha contra los incendios forestales es la prevención. Su aplicación es previa a los eventos y son un conjunto de acciones cuya finalidad es minimizar el riesgo de aparición del fuego, y mitigar sus efectos, si es que finalmente se produce.

En España constituyen un amplio paquete de medidas que suelen incluirse en el seno de planes sectoriales de prevención por parte de las Comunidades Autónomas.

Todo plan sectorial de prevención posee un conjunto de objetivos a cumplir bien determinados. Como ejemplo significativo, los objetivos básicos del Plan sectorial de Prevención del INFOCAL en Castilla y León son:

- Evitar los incendios causados por negligencias o intencionalidad.
- Conocer a la mayor brevedad posible la existencia del incendio.
- Reducir el tiempo entre la alerta, el diagnóstico y las primeras medidas de actuación.
- Disponer de los recursos humanos y materiales adecuados de acuerdo con las necesidades.
- Reducir al máximo las pérdidas originadas por los incendios forestales.

Todas las medidas aplicadas actualmente son propuestas principalmente para tratar de conocer y dominar las causas que han dado origen al incendio. Para alcanzar los objetivos de prevención existen diversos tipos de medidas como: acciones de tipo forestal, de ordenación del territorio, de la educación ambiental, de la difusión de la información, etc. En su ejecución participan multitud de áreas de conocimiento y grupos sociales lo que hace difícil su puesta en funcionamiento.

Un plan sectorial de prevención pertenece a un plan de incendios más global y consta de acciones dirigidas a población y acciones dirigidas al territorio. Dentro de las primeras tenemos por ejemplo las encaminadas a una regulación administrativa en el uso de quemas controladas, las acciones sociológicas y de educación ambiental. En las segundas acciones dirigidas al territorio tenemos: la selvicultura preventiva, defensa de masas forestales, quemas controladas, etc.

La predicción del riesgo es también incluida en estas mediadas preventivas por parte de algunos autores (Vélez 2000). A nuestro juicio la predicción ocupa un lugar independiente fuera de la prevención, porque su finalidad es detectar el riesgo de que el evento aparezca para que puedan actuar los medios de extinción con eficacia. La prevención en cambio son un conjunto de acciones continuadas que deben mantenerse durante un periodo, exista o no peligro definido a escala diaria, para que cuando éste aparezca, las consecuencias sean mínimas. En tal caso la predicción podría ayudar a la prevención a la hora de regular incendios prescritos o permisos de quemas, pero la predicción del peligro, en sí, no constituye una medida preventiva de fuego.

Año tras año los planes sectoriales de prevención de las Comunidades Autónomas tratan de reducir los resultados de incendios registrados, y en la mayoría de las ocasiones, a pesar de los esfuerzos, los incendios vuelven a acontecer tarde o temprano. Por ejemplo, en Galicia la tendencia del número de incendios es al aumento. Si bien el año 2003 se registraron 5345 incendios en la temporada veraniega. En 2004 se redujeron a 3849 incendios en esas mismas fechas. Tal reducción podría ser atribuida a la buena gestión preventiva, pero el año 2005 se produjeron 5537 a pesar del mantenimiento de los planes de prevención y de los esfuerzos de las autoridades competentes.

Los datos del número de incendios acontecidos en Galicia hasta el año 2005, así como de áreas geográficas como el oeste de Castilla y León, indican una tendencia al alza. Con estos datos en la mano queda en entre dicho la eficacia de los planes preventivos en la mitigación del fuego. Todas las medidas que se tomen en este sentido son positivas para tratar de reducir los incendios, pero a nuestro juicio, aunque consiguieran ese objetivo, si las condiciones son las favorables el fenómeno aparecerá. En esta tesis trataremos de entender por qué el fuego aparece sólo en determinadas fechas y no en otras.

Ya hemos comentado con anterioridad que en trabajos de este grupo previos a esta tesis, ya se demostró que el fuego responde a un ciclo anual con dos estaciones de fuego bien diferenciadas a escala anual en Galicia. A escala mensual además observamos que además existe un sincronismo en la aparición del fuego con otras regiones contiguas como Tras os Montes en Portugal o el área comprendida por las provincias de León, Zamora y Salamanca. E incluso a escala diaria este sincronismo es observado. Esto es debido a que todas esas regiones en determinadas fechas poseen unas condiciones comunes que favorecen que los incendios aparezcan. Bajo nuestro punto de vista el fenómeno se podrá entender mejor cuanto más conozcamos cuales son las condiciones

en las que se manifiesta. Los modos frecuenciales de aparición del fuego no parecen responder a ningún fenómeno de tipo social, político, ni de gestión ya que el fuego aparece sincrónicamente en regiones cuyos modos de vida, administración y gestión son bien distintos. Cada una de las regiones anteriormente comentadas poseen planes de prevención diferentes puesto que pertenecen a comunidades autónomas diferentes, y son las que tienen las competencias. Más claro aun es el caso de Tras os Montes que incluso pertenece a otro Estado de la Unión Europea como es el portugués. Sean cuales sean las medidas preventivas utilizadas en las diferentes áreas vemos que, cuando el fuego aparece, no entiende de límites autonómicos ni de fronteras.

Sin dejar de considerar que los esfuerzos en la prevención son necesarios para minimizar los impactos del fuego, nosotros pensamos, que deben aplicarse sin ignorar los condicionamientos físico-atmosféricos que hacen posibles los incendios. Cuando las atmósfera lo permita, los incendios aparecerán sin remedio, sean cuales sean las causas. En nuestra opinión las medidas preventivas deben, por lo tanto, seguirse aplicando para reducir los daños y el número de incendios al mínimo posible, pero sin olvidar la forma con que los eventos de fuego van a aparecer inevitablemente en la realidad, respondiendo a determinadas condiciones físicas de la atmósfera, cualesquiera que sean las acciones preventivas que se vayan a tomar.

A continuación se muestran los distintos tipos de medidas preventivas que pueden llevarse a cabo de manera general en la mayoría de los planes para la consecución de sus objetivos, pero dado que tampoco es este el objetivo principal de la tesis, se muestran de manera muy resumida algunas de las que hemos considerado más importantes:

Selvicultura preventiva

Un tipo de medidas muy utilizados es la selvicultura preventiva. El principal objetivo de este tipo de medidas es la autoprotección de las masas forestales frente al fuego. Principalmente se trata de crear o modificar las masas forestales existentes para que el fuego no aparezca o para que si aparece, la velocidad de propagación disminuya. Se trata en definitiva de hacer a las masas más resistentes a la propagación del fuego. Es uno de los pilares más importantes en la prevención. Las actuaciones que pueden realizarse se dividen en dos tipos:

- Acciones que modifican la estructura del bosque
- Acciones que modifican la composición específica del bosque.

Dentro del primer punto se encontrarían, por ejemplo, la creación de áreas cortafuegos, que conviene decir, que lo único que tratan es de modificar la estructura de la vegetación, pero no la eliminan en su totalidad. Surgieron en Estados Unidos y los hay de diversos diseños, pero normalmente aprovechan vaguadas, cursos de agua, divisorias de aguas, y siempre perpendiculares a los vientos dominantes. La anchura va a depender de la altura de la vegetación. Otro ejemplo que sí elimina toda la vegetación hasta llegar al suelo mineral son las franjas cortafuegos, de mucho más impacto visual. Las franjas auxiliares y las franjas de penetración son otro ejemplo de menor entidad que los anteriores, que pueden además ser útiles después en la extinción.

En el segundo punto las medidas consisten en la alternancia de especies menos inflamables, pero son medidas que deben planificarse desde el diseño inicial de una repoblación forestal, por ejemplo.

Otras medidas que también son llevadas a cabo es la eliminación de matorral tratando de favorecer el desarrollo de plantas herbáceas, y la poda de arbolado denso de un bosque. Así se evita que el incendio pase a las copas y eliminas combustible seco más susceptible a la ignición. La maquinaria más usada aquí son las desbrozadoras. El uso de herbicidas es otra acción a veces utilizada por los medios de prevención para eliminar matorral vivo e inhibir su crecimiento. Pero además de los inconvenientes propios de la contaminación por el uso de fitosanitarios, está el problema de que se aumenta el material muerto disponible para el fuego. Es una herramienta útil y más ecológica el uso de ganado ramoneador que elimine matorral.

El fuego es a menudo un método efectivo y barato de mantener el bosque sano y limpio. En ocasiones se hacen quemas controladas para ir a un modelo de combustible más favorable. A este tipo de incendio se le denomina incendio prescrito. Se usa sólo cuando las condiciones meteorológicas seguras existen. Las condiciones específicas de tiempo bajo las cuales un fuego es permitido son llamadas condiciones prescriptivas.

Educación ambiental

La Educación ambiental, sensibilización e información ambiental son herramientas muy útiles en la prevención. En un apartado anterior, ya comentamos, que el esclarecimiento de las causas podía ser una buena información a aportar en la elaboración de medidas preventivas, porque puede controlarse el origen de las causas para que no vuelvan a producirse. Pero la eficacia del uso de dicha información como herramienta en la educación ambiental se pone en duda, dado el número de incendios

que se siguen registrando en regiones como Galicia. Además el origen de las causas es una información que en muchos casos no llega a esclarecerse y, por lo tanto, utilizarla para la prevención puede estar dejando en el tintero muchas consideraciones.

La causas de incendios son utilizadas como la base para la elaboración de programas de educación y sensibilización ambiental. Suponiendo que las programaciones y diseños curriculares de educación ambiental están siendo elaborados correctamente, y que los destinatarios de los mismos son los adecuados, la única limitación es que los datos de los que parten, las causas de incendio, no se conocen en su totalidad. Aunque no compete al objetivo de esta tesis queremos dejar constancia de esta situación como una de las realidades del problema.

Se invierten grandes cantidades de dinero en la investigación de las causas, educación ambiental, campañas informativas etc, por parte de las Comunidades Autónomas, y esto no revierte unos beneficios ambientales en la reducción de los incendios. No están siendo eficaces en la mitigación del fenómeno, a la luz de los datos.

Normalmente desde aproximadamente el 15 de junio hasta el 30 de agosto se han llevado a cabo campañas de sensibilización en los medios de comunicación en forma de anuncios en televisión, cuñas en radio, anuncios en prensa. Su mensaje es de preservación del patrimonio natural y de evitar conductas negligentes. En prensa escrita son también muy comunes los publrreportajes dirigidos a la población donde se dan una serie de directrices a cumplir para evitar que se produzcan incendios.

Uno de los medios de difusión más importantes actualmente es internet donde pueden consultarse multitud de páginas web donde los mensajes y las recomendaciones para la prevención de los incendios están muy extendidos. Destacamos por ejemplo la página web del Ministerio de Medio Ambiente www.mma.es, en la Dirección General de la Biodiversidad dentro de la subdirección General de Política Forestal y Desertificación. La idea principal es transmitir la responsabilidad a la colectividad. La prevención es cosa de todos.

Para que los resultados de las investigaciones se vean reflejados en una concienciación social, deben elaborarse adecuados programas de educación ambiental y encontrar los mecanismos de difusión de la información más óptimos para llegar a los destinatarios, y que así el objetivo pueda alcanzarse. Como hemos visto parece que existe una diversidad de medios suficiente pero se está partiendo de una única información, el origen de las causas, y el objetivo así es difícil de lograr. Habría que añadir y dar un mayor peso a los conocimientos del fuego desde un punto de vista estrictamente físico-

atmosférico. Es fundamental que se informe adecuadamente a la población a cerca de cuándo existe riesgo de fuego (como en Australia), con el fin de evitar negligencias. Aquí juegan un importante papel las Comunidades Autónomas, los grupos de diseño de programas curriculares de educación ambiental, los gabinetes de prensa y los medios de comunicación como agentes transmisores del mensaje. Bajo una situación de riesgo pueden comunicar un mensaje de alarma a la población para que tome precauciones, prohibir el acceso a determinadas zonas, anular permisos de quema de pastos, impedir la quema de vertederos, etc.

Es común, por ejemplo, en los medios de comunicación asociar siempre los incendios forestales con las altas temperaturas, creando un mensaje a la opinión pública de una asociación directa entre ambos. Autores como Vélez (2000) en alguna de sus afirmaciones dice que la aparición del fuego no está ligada a las altas temperaturas en superficie, aunque en otras ocasiones da una gran importancia a ese parámetro al definir los índices de riesgo. En parte compartimos el inicio del comentario para explicar el máximo secundario de incendios que se suele registrar en invierno cuando las temperaturas en superficie no son elevadas, pero no estamos de acuerdo con que el parámetro de temperatura superficial sea utilizado de forma exclusiva en la determinación del riesgo.

En este sentido la opinión pública debería ser informada correctamente acerca del riesgo de fuego para evitar acciones negligentes, también en determinadas épocas invernales, y no sólo durante la campaña de verano. Sin embargo, la mayoría de los índices de riesgo de la bibliografía, y utilizados por las administraciones, incluyen la temperatura superficial como factor esencial. Cuando como podremos analizar a lo largo de esta tesis, la alta temperatura superficial puede ser suficiente pero no necesaria para que exista riesgo elevado.

La prensa suele incurrir en otro hecho, y es en individualizar los eventos de fuego. Un tratamiento individualizado de los incendios como hechos aislados inconexos genera la creencia de una conducta aleatoria del fenómeno, cuando está bien demostrado, y esta tesis muestra algunos casos, que los incendios no aparecen aislados sino a oleadas en áreas de cientos de kilómetros de forma sincrónica. Además, la prensa se centra más en la información de causas y consecuencias individuales, escogiendo de todos los acontecidos el más impactante desde el punto de vista mediático, ello eclipsa el carácter “epidémico-ambiental “ con el que el fuego, a nuestro juicio, aparece. Tal fue el caso del incendio de Guadalajara de julio de 2005, cuando otros tantos incendios

acontecieron en Teruel, Zaragoza, Palencia, Ciudad Real, etc. Omitiendo esa información la opinión pública cree que los incendios nada tienen en relación unos con otros, y que son por lo tanto, eventos aislados y aleatorios, cuando la realidad no es así. También podríamos hablar del mensaje de los medios de comunicación a cerca de la relación entre los incendios y el cambio climático. En los medios suele asociarse el calentamiento global con más aparición de fuego cuando el análisis del problema es mucho más complejo que tal simple relación. Tal discusión es realizada ampliamente en un epílogo de esta tesis.

Un plan de vigilancia y control

Dentro de los planes de incendios forestales de las comunidades autónomas, los planes de vigilancia y detección constituyen en sí mismos un plan sectorial independiente al plan de prevención. No obstante hemos querido hacer mención de los mismos en este apartado porque a nuestro juicio pueden realizar una labor preventiva importante.

Su objetivo es básicamente la detección de posibles focos de incendios para poner en funcionamiento el plan de extinción, pero también poseen una labor disuasoria ante el delito de un pirómano o de un incendiario.

Con los conocimientos de las condiciones de la atmósfera bajo las cuales el fuego puede presentarse, las medidas de vigilancia pueden hacerse más eficaces porque se intensificarán en aquellos días de mayor riesgo, y podrán relajarse en días de riesgo mínimo.

En los días de mayor riesgo la alerta en todos los puestos debe ser máxima, y la disposición del personal continuada, por lo que se deben estudiar los turnos adecuadamente para que días así no queden sin vigilancia ni un minuto.

Además existen bases de datos estadísticos de cuales suelen ser las zonas donde más incendios se producen cada año, será en esas zonas donde deba ponerse más atención en las situaciones más favorables al fuego, desde un punto de vista meteorológico.

Los planes de vigilancia disponen de una red de vigilancia y observación distribuida por todo el territorio donde es aplicado. Consta de puestos fijos complementados con patrullas móviles que tratan de cubrir todo el territorio, además de las técnicas de teledetección.

Participan conjuntamente Policías Locales, Protección Civil, Guardia Civil (SEPRONA), Ayuntamientos y agrupaciones de voluntarios. En Galicia en el año 2007 se han incorporado unidades del SEPRONA a caballo que se encargan de recorrer los

caminos y los senderos del monte como medida disuasoria y de vigilancia. En cualquier caso es tanta la diversidad de medios, que se hace necesaria una correcta coordinación para centrar los esfuerzos de forma eficiente.

También existen diferentes metodologías de teledetección que ayudan en la labor de detección y seguimiento de incendios. Un ejemplo son las cámaras infrarrojas colocadas en lugares elevados como los que usa el sistema BOSQUE desarrollado por la empresa española Bazán, pero está limitada su eficacia a unos cuantos kilómetros. El uso de sensores satélite es otra de las opciones utilizadas pero la periodicidad de paso no es la suficiente como para detectar los focos a tiempo. Además su labor predictiva es escasa. Toda la información extra que los planes de vigilancia puedan manejar de partida y durante los procedimientos serán de mucha utilidad. Pero según la opinión de nuestro equipo investigador el coordinador de estos medios debe tener un conocimiento básico de los mecanismos físicos-atmosféricos que pueden hacer que el fuego aparezca, para así enfocar la atención y no desaprovechar ningún recurso en días de máximo riesgo.

Ordenación del Territorio

Un aspecto importante a considerar dentro de la prevención es la Ordenación del Territorio. Durante los últimos 50 años en España el uso tradicional del suelo en muchas zonas ha variado. Es común en las áreas metropolitanas de las grandes ciudades, y no tan grandes, se haya pasado de un uso de suelo eminentemente agrícola, ganadero y forestal, a ser un suelo urbanizado con una alta dispersión. Se ha generado así un nuevo ecosistema mezcla entre lo urbano y lo natural que es un espacio de interfase de gran superficie donde los incendios han comenzado a aparecer. Son conocidas estas áreas ya a nivel mundial, como es el entorno de la ciudad de Los Ángeles en California (Estados Unidos) o en menor grado las áreas circundantes a Barcelona, Málaga o Santiago de Compostela en España. En esas zonas la convivencia entre las masas forestales y los potenciales focos de ignición propios de una sociedad avanzada es muy íntima, lo que hace que los incendios aparezcan, además con enormes daños materiales y personales por tratarse de áreas residenciales. Esta es una nueva situación que debe afrontarse desde los planes de lucha contra el fuego.

La prevención de incendios se encuentra establecida en planes sectoriales específicos, pero debe ser una materia transversal e interdisciplinaria, y ser incluida en los planes de urbanismo, normas subsidiarias y normativas autonómicas y estatales de usos del suelo. Su finalidad será regular eficazmente la creación de nuevas áreas urbanas teniendo en

cuenta el potencial riesgo de fuego. Las medidas preventivas pueden aplicarse directamente en los planeamientos urbanísticos para ser realizados adecuadamente. Para todo ello, el fenómeno del fuego en determinadas regiones debería conocerse especialmente.

Otro hecho destacable de la última centuria y que ha favorecido un incremento del número de incendios es el abandono de uso de tierras agrícolas y ganaderas. En este caso suelen ser zonas alejadas de las ciudades como por ejemplo Las Arribes Salmantinas. El abandono de actividades agrícolas y ganaderas que mantenían la superficie forestal libre de volúmenes de combustible, ha favorecido la aparición del fuego. La pasividad de las masas aumenta la cantidad de todos los combustibles existentes. Este ejemplo es similar a otras áreas de regiones como Galicia.

En el siglo XX también existieron cambios en el usos del suelo debido a políticas forestales de repoblación que introdujeron especies como el eucalipto, y pino en regiones propias de especies frondosas menos proclives al fuego. Esos monocultivos crearon una continuidad que favorece el progreso del fuego. El ejemplo más claro es Galicia, pero también podemos destacar Portugal.

Políticas agrarias y ganaderas como consecuencia de la anexión de España y Portugal a la Unión Europea favoreció también cambios en los cultivos y usos del suelo y abandono de tierras que eran susceptibles de ser objetivo de las llamas.

Es pues, la Ordenación del Territorio en sus diferentes niveles de la administración, una labor fundamental en la prevención de la lucha contra los incendios. Debe ir acompañada de la elaboración de una legislación adecuada al respecto. Las experiencias sufridas, no cabe duda, que pueden colaborar en una mejora de las medidas en pro de la disminución de los incendios, pero se hace cada vez más importante, investigar el problema del fuego para conocerlo mejor y saber establecer las planificaciones y tomar las decisiones que en cada momento resulten más adecuadas.

Algunos autores como Vélez (2000) establecen que la predicción meteorológica del riesgo de fuego es una acción específica dentro de las medidas de prevención. La predicción es una herramienta en sí misma y debería desmarcarse como medida preventiva por trabajar a una escala más pequeña. La mayor utilidad de la predicción se alcanza en labores de vigilancia y control y en las inmediatamente previas a las tareas de extinción, por funcionar a una escala meteorológica-diaria, que es a la que aparecen

los incendios. La predicción permite adelantarse al fenómeno con la suficiente antelación como para poder disponer de los medios suficientes.

La prevención en cambio trabaja a escala mayor, extendiéndose a determinados periodos. Dentro de la prevención es más útil un conocimiento de las condiciones de escala climática favorables al fuego en la región como información básica para elaborar medidas como: los incendios prescritos, elección de especies en las repoblaciones, trabajos selvícolas etc. Conocer las condiciones que originan el fenómeno a escala climática por parte de los gestores es muy importante porque son los que deben ejecutar las medidas preventivas más directas para la lucha contra los incendios. Si los gestores saben cuando y por qué el fenómeno del fuego va a aparecer en determinadas épocas, podrán tomar las medidas preventivas oportunas. Por ejemplo, si el gestor tiene conocimiento de que se aproxima una estación de fuego, tareas de silvicultura preventiva podrían ponerse en funcionamiento y prohibir quemas controladas antes de que el fenómeno a escala meteorológica diaria surja y pueda sorprenderles.

Una vez situados a escala climática dentro de una estación de fuego, entra en juego la predicción del riesgo a escala diaria para que el gestor tome las medidas de vigilancia y control y extintivas pertinentes. Tomados los remedios preventivos de carácter permanente, en el tiempo el único frente de acción posible que queda para reducir efectos negativos del fuego, son las medidas de vigilancia y control y las de extinción. Consideramos que éstas son las medidas que deben tener una mayor implicación y consonancia con las condiciones atmosféricas de peligro diario porque se pueden aplicar de forma variable en función del riesgo, a una escala similar en la que aparece el fuego. Con una buena predicción del riesgo de un día para otro los medios de extinción pueden gestionarse diferencialmente para responder de manera adecuada y reducir daños. Algo que estudiaremos al hablar de las estrategias.

En esta tesis se trata de comprender mejor el fenómeno de los incendios forestales desde un punto de vista físico de la atmósfera. Posteriormente serán cada uno de los agentes implicados los que podrán tener en cuenta los avances científicos en el conocimiento meteorológico de los incendios para mejorar su labor.

III.2.2. Extinción

La gestión en la extinción de los incendios es una parte de la planificación de vital importancia a la hora de reducir los efectos ambientales negativos que pueden producir. Como veremos más adelante al hablar de la planificación, los planes sectoriales de extinción llevados a cabo en las Autonomías, forman parte de un Plan General de Incendios Forestales. Este Plan engloba además de ese plan sectorial de extinción, planes sectoriales como el de prevención, cuyas acciones fueron ya comentadas en un apartado anterior. Un plan de extinción comprende un conjunto de procedimientos operativos, medios humanos y materiales cuyo objetivo es la extinción de los incendios que ya se han iniciado. Un ejemplo es el Plan de Extinción del INFOCAL en Castilla y León.

Las medidas de extinción son tomadas desde el Centro de Coordinación de forma inmediata, a criterio de los gestores (jefes de jornada), siguiendo las directrices del plan sectorial, y respondiendo a los mecanismos de detección de incendios. El jefe de jornada decide cuantos medios dedicar, y asigna un jefe de extinción que adoptará las medidas precisas en aplicación del artículo 73 del Reglamento de Incendios Forestales. Existen aplicaciones informáticas que ayudan a la gestión de los medios, como bases de datos de los recursos disponibles a tiempo real. Es el caso del Programa Lumes utilizado en Galicia que es un catálogo actualizado de medios y recursos.

El riesgo de fuego, en nuestra opinión, queda perfectamente definido por las condiciones físicas de la atmósfera, las cuales pueden predecirse. De esta manera puede, a priori, declararse el riesgo de fuego y elaborarse las estrategias posibles y eficientes durante la extinción. Con una adecuada predicción del riesgo de fuego en los días precedentes desde el centro de coordinación, pueden planificarse los medios para que las tareas obtengan unos resultados satisfactorios y no sean cogidos por sorpresa.

Las medidas de extinción pueden aplicarse de forma diferencial, respondiendo al riesgo predicho, o todo lo contrario, de manera similar a lo largo del tiempo, como las medidas de carácter horizontal. Con una estrategia diferencial los medios de extinción pueden concentrarse o restringirse dependiendo de la necesidad indicada por la predicción. Todo ello porque consideramos que el fuego no aparece de forma aleatoria, sino con una dependencia de la situación atmosférica fácilmente predecible en un área que puede abarcar varias provincias, aun encontrándose en comunidades autónomas diferentes. Todo lo referente a las estrategias será estudiados más profundamente en el siguiente apartado.

El cometido de esta tesis no es profundizar en las medidas concretas de extinción al tratarse de un aspecto perteneciente a la gestión más que físico, no obstante consideramos importante hacer algunos comentarios sobre diferentes aspectos de manera sucinta.

Tres aspectos son fundamentales en la extinción: Materiales, Tareas de Extinción y plan de ataque.

En los procedimientos operativos de un plan de extinción se incluyen un conjunto de tareas, que según qué tipo de herramientas requieran, se pueden dividir en:

- Tareas de extinción con herramientas manuales: Corte, cavado, sofocación, enfriamiento, etc.
- Tareas de extinción con herramientas mecánicas: Trabajo con motosierra o con desbrozadora.

Más adelante veremos que estas tareas pueden realizarse tanto en ataque directo como en indirecto.

En las tareas con herramientas manuales son empleados diversos medios materiales. Así, en el corte y el cavado se emplean: palas, Pulaski, rastrillos Macleod, podones, hachas, azadas etc, y el principal cometido es retirar material combustible de una superficie prefijada. Así, por ejemplo, en la sofocación se trata de eliminar el oxígeno en torno a la llama y para ello se usan batefuegos, extintores de mochila, arrojo de tierra con Pulaski, etc. Y en el caso del enfriamiento se trata de reducir el calor empleando en el proceso físico de combustión arrojando agua mediante mochilas, mangueras de vehículos autobomba, etc. Aquí conviene destacar el uso de retardantes más efectivos que el agua a la hora de captar calor por su elevado punto de evaporación.

Los medios materiales en la extinción con medios mecánicos utilizan motosierras o desbrozadoras para eliminar combustible disponible.

Otros medios materiales son los medios de transporte como camiones todoterreno, furgonetas, vehículos, nodriza etc, maquinaria pesada como buldózers así como un equipo aéreo de aviones y helicópteros. Los camiones todo terreno sirven para el transporte de personas y suelen llevar también una bomba de agua con un depósito; las furgonetas transportan comida y agua para el personal; los vehículos transportan personas a la zona del incendio; el nodriza suministra de agua a las motobombas o camiones todo terreno y es de alta capacidad.

Pero quizás el medio más indispensable sean los medios humanos necesarios para llevar a cabo los procedimientos de extinción, ya sean cuadrillas de tierra, brigadas de rápida

intervención, conductores, pilotos, bomberos, voluntarios, etc, que necesitan un entrenamiento y formación adecuados para saber acometer adecuadamente las tareas.

Un ejemplo de puesta en funcionamiento del procedimiento de extinción en una situación real puede ser el que se muestra a continuación:

El desencadenante del inicio de un plan de extinción es la recepción de un aviso de incendio. El aviso suele venir a través de una llamada externa a un teléfono de emergencia por parte de un ciudadano que está observando visualmente el incendio, o el aviso puede ser comunicado vía interna por los sistemas de vigilancia antiincendio establecidos en los planes de vigilancia.

Una vez dado el aviso el primero en llegar por tierra al lugar del siniestro es el guarda forestal que toma el mando de la operación hasta que el técnico acuda. Los medios de que se suele disponer inicialmente para acometer un incendio forestal suelen ser:

- Los primeros medios en llegar suelen ser las Brigadas de rápida intervención que se desplazan en helicóptero y son dirigidas por otro técnico de base. Son personas entrenadas y experimentadas en acometer el fuego en su estado inicial y posterior propagación. Son los encargados de abrir la línea de defensa. Su misión es atacar el fuego hasta que lleguen las cuadrillas de tierra posteriormente suelen abandonar el lugar.
- Cuadrillas antifuego: formadas por personal de tierra y cuyo cometido es atacar el fuego desde tierra con elementos como: Batefuegos, palas, etc.
- Autobomba es un vehículo todo terreno que trata de aproximarse a la línea de defensa para proporcionar agua.
- Tractor de cadena (Bulldózer) que se encarga de abrir la línea de defensa para facilitar el acceso al incendio.
- Medios aéreos que suelen ser aviones y helicópteros. Su papel es arrojar agua y retardantes en el frente del fuego.

Si el fuego ha entrado en una fase ya avanzada de propagación el técnico acudirá a la zona y se hará cargo de la coordinación de los medios disponibles en un puesto de control avanzado *in situ*.

En un procedimiento como el visto en el ejemplo anterior y en cualquier otro suele ser común utilizar medios aéreos. Suelen ser tres tipos de medios:

- Helicópteros: Bell-205 y Bell-212 de fabricación norteamericana por ejemplo son usados en Castilla y León. Otros utilizados es el Bell-412 americano y el Sokol polaco, ya sea para el traslado de brigadas antiincendios o para la extinción de las llamas. Para este último cometido suelen portar un “bambi”. Es un depósito colgante que puede llenarse de agua en ríos o embalses para después arrojarlo sobre el frente del incendio. Los hay de varios modelos destacando nosotros aquí algunos de ellos: Ecureil (500 l), Bell 412-HP (1500 l), Kamov-Ka T-32 (3500 l) y el KMI-8 (3500 l). En los últimos tiempos se ha ideado un sistema de descarga de agua denominado “Helibalde” que sustituya al “bambi” tradicional mejorando en eficacia en carga y lanzamiento de agua. También existen los helicópteros con depósito propio que toman el agua a través de una manguera en vez de con un “bambi”.
- Aviones de carga en Tierra: cargan en la base agua con retardante (2000 litros) para arrojarlo delante del frente de fuego.
- Hidroaviones como el Canadair CL-415 Waterbomber que es el más utilizado en España. Son de 19.82 m de largo, 8.98 m de ancho, 28.61 m de envergadura y con un tanque de 6160 l. Ellos recargan grandes cantidades en embalses y los arrojan en el área del frente.

Normalmente en incendios pequeños, la descarga la hacen en parte del frente de llama, y la otra parte en el lugar no apagado, extinguiendo el fuego o reduciendo su intensidad. Esto también es realizado en grandes incendios, pero lo que se suele hacer es crear un cortafuegos químico echando retardante delante del frente.

Existen distintas formas de atacar el fuego. Una vez iniciadas las labores de extinción por parte de los medios de lucha antifuego, estos pueden atacar el fuego de dos formas:

- Directamente: Suelen ser tareas de sofocación y enfriamiento que consisten en atacar las llamas con agua, batefuegos, echando paladas de arena, separando combustibles con rastrillos. Pueden usarse motobombas o también existen

personas que van con mochilas de agua con retardante humedeciendo los combustibles, todo dependerá de la facilidad de los accesos al frente.

Además del agua, el retardante utilizado en el enfriamiento es una sustancia química en forma líquida que al añadirla al combustible retarda la aparición de gases de combustión encargados de formar la llama y reduce la liberación de calor y, por lo tanto, inhibe la progresión del fuego.

- Indirectamente: Se opta por este modo si son llamas mayores de 2 metros o si el fuego avanza por las copas. En este caso se crea una línea de defensa (figura III.2.2.1) y así se elimina todo el combustible entre dicha línea y el fuego para impedir que el fuego avance. Una de las formas más frecuentes es la construcción de un cortafuego. En este sentido es positivo aprovechar los cortafuegos naturales (Roquedos, embalses, masas frondosas húmedas). Por ejemplo, una línea de defensa puede hacerse en la ladera opuesta de una montaña inmediatamente después de la cumbre.

Figura III.2.2.1. Localización de la línea de defensa

Es el lugar más lógico donde situarla. La razón de esta localización es la influencia que la pendiente ejerce en la propagación de un fuego. Un fuego físicamente es un fenómeno de dinámica vertical. Si la componente vertical del suelo desaparece, como es el caso de la línea de cumbre de una montaña, el fuego se ve frenado en su propagación ascendente y progresa con mayor dificultad ladera abajo. Por ello, inmediatamente después de la cumbre, es un buen lugar para situar la línea de defensa. Las principales tareas para construirla son de tipo corte, desbroce, cavado y enfriado con retardante utilizándose incluso buldózer. Las líneas deben tener una serie de características a considerar como, por ejemplo, la anchura. Ésta depende del tipo de fuego que se esté atacando. Si es un incendio de copas la anchura recomendada son 8 metros, y en

un fuego de suelo estaríamos hablando de 4 metros. La anchura recomendada, por ejemplo, para un cortafuegos es dos veces y media la altura que las llamas puedan alcanzar. Ya vimos que unas buenas medidas preventivas en el tratamiento del bosque, previo al incendio, facilita las labores de extinción a la hora de establecer las líneas de defensa. En este tipo de ataque es importante tener bien estudiados los accesos a la línea de defensa por si fuera necesario huir rápidamente. En el caso del famoso incendio de Guadalajara de julio de 2005 murieron 11 personas en las tareas de extinción por verse sorprendidos por el fuego mientras atacaban el incendio creando una línea de defensa. No pudieron escapar a tiempo.

Los inconvenientes de este modo de ataque es que debe impedirse a toda costa que el fuego supere la línea de defensa, porque si las llamas son demasiado altas puede saltar una pavesa por encima y propagarse el incendio detrás de la línea que los medios de extinción habían creado.

Existen una serie de gráficos basados en consideraciones empíricas, que no son presentados aquí, que sirven a los técnicos de extinción para tomar las decisiones de qué tipo de ataque deben realizar. Son gráficos donde en función de la velocidad de propagación, calor por unidad de área y altura de la llama nos indican las diferentes formas que pueden utilizarse para atacar el incendio, y qué medios se deben utilizar. Sirven como orientación de forma general a la hora de tomar decisiones dentro del plan de extinción, pero después cada incendio posee sus propias particularidades y el técnico debe saber responder de forma adecuada en sus decisiones.

Para que los técnicos sepan qué tipo de ataque realizar es importante también identificar, los ya vistos aquí, modelos de combustible, es decir, saber qué se está quemando. Es una información básica muy utilizada en los planes de extinción de nuestro país. Para identificar dichos modelos existen claves en la bibliografía (Rothermel 1972,1983,1986) (Vélez, 2000), pero dichos modelos no poseen ningún carácter predictivo del riesgo de fuego. Sucede que a veces en un lugar existe la combinación de varios modelos de combustible, y la acción debe ser combinada, atacando directa e indirectamente.

En nuestra opinión, los técnicos deben tener también un conocimiento exhaustivo de las condiciones meteorológicas para saber cómo atacar el fuego ya que éstas pueden influir muy fuertemente en la altura de las llamas y en la velocidad de propagación.

III.2.3. Planificación y estrategias

En primer lugar sería conveniente hacer una referencia a qué es un plan de incendios. En el estado español, como ya ha sido destacado en otros apartados, las competencias referidas a la conservación de la naturaleza fueron transferidas a las Comunidades Autónomas y son éstas, por lo tanto, las que deben ejercer las funciones de lucha contra los incendios forestales a través de las consejerías de medio ambiente correspondientes. En respuesta a la adquisición de las competencias en la lucha contra los incendios las Comunidades Autónomas elaboran un plan autonómico de incendios de carácter anual. El objetivo del plan es establecer procedimientos de actuación, organizar y coordinar los recursos y servicios disponibles para luchar contra los incendios dentro del territorio competencial. Un ejemplo de plan de incendios de aplicación real es el INFOGA de la Comunidad Autónoma Gallega.

La mayoría de los recursos son de titularidad autonómica, pero existen otros de la administración de estado, o de titularidad pública o privada, que son también puestos a disposición de las Comunidades Autónomas y, por lo tanto, son incluidos en la planificación.

Además de las funciones procedimentales y de organización a nivel de prevención, extinción, etc, los planes suelen incluir previsiones zonales del riesgo, según diferentes índices de peligro de fuego existentes. Cada comunidad autónoma elige el suyo. El modelo GD, presentado y aplicado en esta tesis es uno de los índices que fue utilizado para la planificación por parte de la Comunidad Autónoma gallega en el seno del Proyecto Álamo 98, dando buenos resultados. También se desarrolló anteriormente con similares resultados el Proyecto Abedul 96 en el Principado de Asturias.

En el apartado correspondiente a la legislación estudiamos los diferentes niveles de la normativa a la que los planes deben ajustarse rigurosamente: autonómico, estatal y comunitario.

Todo plan de incendios también suele ser poseedor de una base de datos del riesgo pasado de incendios por zonas, durante un tiempo determinado. En este sentido los índices de riesgo más utilizados son el conocido índice de frecuencia anual, el número de incendios por trimestre acontecidos en una comarca y el Daily Fire Risk (**DFR**), de escala diaria. Se calculan con el número de incendios dividido entre el tiempo en el que han tenido lugar en un emplazamiento determinado, e indican el riesgo con que el fuego aparece (a esa escala temporal).

En la planificación suele realizarse una división del territorio para facilitar la gestión de los medios. La división a la que se suele recurrir es a la administrativa en provincias, comarcas y términos municipales, por ser la más fácil. Ya hemos comentado aquí que los incendios aparecen de forma sincrónica en comunidades y provincias limítrofes, es lo que podríamos definir como sincronismo regional del fuego. Dicho sincronismo, suficientemente demostrado en trabajos anteriores de este equipo, viene a decir que, aunque a efectos de distribución de medios utilizar la división administrativa pueda parecer eficaz, puede ser más eficaz si consideramos en la planificación todas las áreas administrativas incluidas en un área de riesgo. Dicho área viene a coincidir con áreas mesoescales de cientos de kilómetros. La actual distribución administrativa no contempla este hecho, que es toda una realidad, por ejemplo, en áreas del noroeste Peninsular.

Los espacios pertenecientes a la Red de Espacios Protegidos de las distintas Comunidades Autónomas, así como los parques de la red nacional, suelen contemplar en sus planes específicos de ordenación de los recursos, y de uso y gestión, los procedimientos a seguir en caso de incendio forestal dentro del área protegida. No obstante los medios disponibles dentro del área protegida están en coordinación con los medios externos al área, eso sí, la vigilancia dentro de los espacios es mucho más intensa.

Los planes de incendios suelen tener dos tipos de estructuras desde el punto de vista temporal:

- Permanente
- Estacional

Una estructura permanente actúa a lo largo de todo el año y establece medidas de selvicultura preventiva, de mantenimiento de medios materiales e infraestructuras, formación de los recursos humanos, de divulgación y educación ambiental, etc. Su lema es que los incendios se pueden apagar durante todo el año y no sólo en las épocas de alto riesgo.

La estructuración estacional responde a la diferente intensidad con que el fenómeno del fuego aparece a lo largo del año. Los datos del número de incendios en Galicia muestran dos estaciones de fuego bien diferenciadas, una en verano y otra en invierno. Luego todo indica que la lógica es mantener en dichas épocas una estructura diferente que en el resto del año.

La estructura estacional actúa en las épocas de mayor riesgo, y en ella predominan las tareas de extinción, de vigilancia, detección y de investigación. Bajo esta estructura hay una mayor adquisición de medios y mayor disponibilidad de los mismos. Toda su eficacia dependería de localizar, temporalmente en el calendario anual de forma correcta, las estaciones de fuego existentes en el ámbito de la Comunidad Autónoma correspondiente. En el caso de Galicia habría dos estaciones, una sería a finales del invierno y otra con un máximo a mediados de agosto.

Dentro de la estructura estacional lo normal en la gestión actual es aplicar todos los días los mismos medios siguiendo una estrategia horizontal. Pero habría que contemplar que dentro de cada una de las estaciones el fuego aparece a oleadas durante varios días, en los que la planificación debe intensificar la disponibilidad, y así mejorar la eficacia de los medios. Eso se consigue considerando una estrategia diferencial. Aspectos que serán comentados al final de este apartado.

Todo plan de incendios se subdivide en varios planes sectoriales cada uno con objetivos bien definidos y que en su conjunto alcanzan el objetivo global del plan. Estos planes sectoriales son:

- Plan de Prevención
- Plan de Vigilancia y Detección
- Plan de Extinción
- Plan de Investigación
- Plan de Formación

Las medidas propias de un plan de prevención han sido suficientemente expuestas. El plan de vigilancia también fue presentado. Las acciones del plan de extinción también han sido presentadas. Tareas de plan de investigación fueron comentadas sucintamente. El plan de formación engloba todas las labores de formación y entrenamiento del personal que participa en las tareas del plan.

A su vez junto a estos planes sectoriales existen redes de información que apoyan a las labores y procedimientos existentes. Tal es el caso de la Red de Vigilancia ya comentada en su momento, que es un conjunto de puestos fijos y patrullas móviles. Suele haber también una Red de Transmisiones que favorece los enlaces en la coordinación, así como la transmisión de datos, y una Red de Observatorios meteorológicos pertenecientes al Instituto Nacional de Meteorología, que pueden

aportar datos pasados y presentes útiles para el cálculo del riesgo de fuego por medio de índices. Un ejemplo de índices que utiliza datos de este tipo es el índice canadiense (FWI) que será estudiado en esta tesis. Otros índices como el de Haines o el GD no utilizan datos de superficie y necesitarían información meteorológica obtenida en una estación de radiosondeo. En cualquier caso todos los datos de los que se pueda disponer pueden ser útiles, aunque evitando caer en la redundancia. Si los incendios aparecen a escala mesoescalar los parámetros verdaderamente eficaces son los representativos de esa escala. No tiene ningún sentido, a nuestro juicio, poseer una base de datos excesiva de parámetros superficiales locales cuando de forma sencilla, en una única medición, puedes obtener el riesgo de toda un área mesoescalar. En este sentido la información necesaria debe ser simple y facilitar la operatividad.

Los índices de pronóstico del riesgo de incendios son técnicas de predicción, ellos simplemente tipifican el riesgo que puede existir de que un incendio se origine y se desarrolle. Aportan información para las medidas de extinción, ya que permite distribuir con antelación los medios más eficazmente en los días que exista un riesgo mayor.

El cuerpo central de esta tesis no consiste en la aplicación de un modelo predictivo del riesgo de fuego (como el GD) en la gestión, ni las diferentes estrategias que puedan ser aplicadas. En ello ya se han centrado otros estudios elaborados anteriormente por otros miembros de este equipo investigador (Simal 2006). En todo caso haremos un breve comentario sobre la gestión y las estrategias existentes, sin entrar en análisis profundos.

Existen multitud de eventos, sobre todo en el campo de la seguridad, en los que se debe actuar con la mayor celeridad y eficacia, por ello, se elaboran planes de emergencia y actuación. Dentro de estos planes se presentan los medios para abordar el problema así como su gestión.

En la gestión de los medios un elemento importante son las estrategias a seguir, las estrategias tratan sobre cómo se distribuyen dichos medios.

Existen dos tipos de estrategias:

- **Horizontal:** Todos los días los mismos medios. Útil cuando se lucha contra eventos imprevisibles.
- **Diferencial:** Cuando un evento es predecible y la predicción es buena los medios se aplican acordes con la realidad. Cada día se aplicarán los medios necesarios según dicte la predicción.

En el evento del fuego una estrategia horizontal en la práctica no puede usar todos los días el 100% de los medios ya que tanto el mantenimiento de los medios (aeronaves, motobombas, etc), como las licencias y los periodos de descanso para el personal, deben ser respetados. Debido a esto, en una estrategia horizontal, el nivel de dedicación nunca será superior un 80 %; significa que de cada 100 medios existentes, cada día, solo puedo contar con 80 porque debido a los turnos, vacaciones, días libres, mantenimiento de máquinas, no siempre están todos disponibles. Esto conlleva más gastos, ya que estás pagando salario y mantenimiento para 100, pero solo dispones de 80. Tanto los días de muchos incendios como los días de nula aparición contamos con los mismos efectivos, un 80 %.

Cuando un evento es irregular, siguiendo una estrategia de estas características, se va a producir que muchos días se encuentren desbordados sin medios disponibles suficientes, y sucederá que otros días el 80 % disponible se encuentre parado porque no pasa absolutamente nada. Esto es algo que sucede con los incendios forestales.

En una estrategia diferencial los condicionantes de la disponibilidad del 100 % de los medios deben tender a acoplarse con los días de más riesgo de aparición del fuego.

Ante un evento de carácter irregular, como son los incendios, si sigo una estrategia horizontal, los días de mucha intensidad sólo voy a contar con el 80 %. En los días de alta intensidad, si aumentara el porcentaje de medios, aumentaría la eficacia. En los días con baja intensidad, si disminuyera el porcentaje, también aumentaría la eficacia. Para poder hacer eso, en la realidad, necesitaríamos que el evento irregular fuera predecible, a fin de saber si los medios deben de incrementarse o disminuirse para aumentar la eficacia. En los días en los que se prevén más incendios se acoplan el número máximo de efectivos y los días de permisos, turnos libres, mantenimiento, etc se acomodan en los días previstos de baja actividad. Estaríamos en ese caso en una estrategia diferencial que iría acorde con la predicción. Pero siempre que el evento sea predecible y la predicción sea buena.

Existe un debate entre la comunidad científica y los gestores de la lucha antifuego, de la conveniencia de usar un índice de riesgo de incendios operativo o un índice estrictamente físico. Los gestores demandan una mayor operatividad solicitando un índice numérico lo más simple posible con un solo dígito, y en cambio la física del problema exige una rigurosidad alta. Muchos autores como Haines (1988) o Van Wagner (1974b) han optado por la operatividad dejando lagunas en la definición adecuada del riesgo, en su carácter predictivo. Existen otro tipo de índices meteorológicos de fácil predicción (KI, TTI), que de partida no fueron definidos como índices de riesgo de fuego, pero que podrían aportar alguna información, de hecho en ocasiones se han utilizado como tales. Pero estos también carecen de una adecuada capacidad de detección del riesgo de fuego.

Bajo nuestro punto de vista un índice debe ser de una fácil operatividad, pero sin perder la rigurosidad física. A lo largo de este trabajo veremos que el estado de la columna atmosférica guarda muy estrecha relación con la aparición del fuego. El fenómeno no es un problema aleatorio, es predecible y por lo tanto, las actuaciones necesarias para la lucha antifuego dejan de estar sujetas a la incertidumbre. Todo este fundamento queda materializado en el modelo GD.

El modelo GD utilizado en esta tesis, con su carácter predictivo y su coherencia física con el riesgo de fuego, trata de buscar un equilibrio entre la operatividad y la fidelidad a la física. Por medio del modelo GD podemos tipificar el riesgo de incendios en un área mesoescalar y predecir el número de incendios para una región concreta, resultados de gran utilidad práctica en la gestión.

El éxito de la estrategia diferencial depende críticamente de la calidad predictiva de que se disponga. Nosotros consideraremos el modelo GD como base predictiva sobre la que debe asentarse la estrategia diferencial.

El modelo GD ha sido suficientemente validado. La autoconsistencia de los resultados obtenidos en esta tesis, y en otros trabajos anteriores, avalan que se trata de un modelo bueno de predicción del riesgo de incendios, así como, del número de incendios.

Siguiendo el modelo de predicción GD es posible aplicar una estrategia diferencial en la gestión de los medios de la lucha antifuego mejorando la eficacia. De esta forma los días de mayor riesgo de fuego trataremos que estén el 100% de los efectivos. Los días de riesgo es alto se aplicaran el 90 % de los medios. Los días de riesgo medio tendrán

un 40 % y los días de riesgo mínimo un 15%. Estos porcentajes son los niveles de dedicación y pueden variarse, pero siempre deben de seguir esta proporción acorde con la ordenación del riesgo de incendio tipificado por el modelo GD.

Pueden ser representada gráficamente la distribución de los medios de acuerdo con una estrategia horizontal (Figura III.2.3.1.) a lo largo de un periodo de tiempo considerado. Hemos considerado el 80% como el nivel de dedicación real.

Figura III.2.3.1. Distribución de medios según una estrategia horizontal.

Según una estrategia diferencial (Figura III.2.3.2.) consideramos que los días predichos con mayor riesgo de incendios suman un periodo T_1 y llevan asociado un nivel de dedicación N_1 , los siguientes definen un periodo T_2 , con un nivel de dedicación N_2 , y así hasta los cuatro niveles que contempla el modelo GD.

Figura III.2.3.2. Distribución de medios según una estrategia diferencial.

$N_1 \dots N_4$ son los distintos niveles de dedicación donde $N_1 > N_2 > N_3 > N_4$

El periodo total considerado:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (\text{III.2.3.1})$$

Del esquema anterior se puede deducir si la estrategia diferencial es posible, entendiendo por posible que no conlleve para todo el periodo más dedicación que la horizontal, es decir, mayor presupuesto. Para ello el área de dedicación ($T \cdot 80$) de la estrategia horizontal debe ser mayor o igual que el área resultante de la suma de las distintas áreas de dedicación de la estrategia diferencial ($T_i \cdot N_i$).

$$(T \cdot 80) \geq \sum_{i=1}^4 (T_i \cdot N_i) \quad (\text{III.2.3.2})$$

Definimos el parámetro de Posibilidad (**P**) como:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^4 (T_i \cdot N_i)}{(T \cdot 80)} \quad (\text{III.2.3.3})$$

La estrategia diferencial será posible mientras P sea menor o igual a 1. Cuanto menor sea P más posible será la estrategia. Para aquellos valores mayores de $P=1$ diremos que la estrategia no es posible. Si $P = 0.95$, la estrategia diferencial supone un ahorro del 5 % con respecto a la horizontal.

Una vez verificado que la estrategia diferencial es posible es conveniente demostrar si además es más eficaz que la horizontal. Para ello, los medios dedicados por el número de incendios deben ser mayores que en la horizontal, es decir, los días de más disponibilidad deben ser los de mayor número de incendios.

Representando los niveles de dedicación de una estrategia diferencial frente al número de incendios acontecidos para cada categoría, se busca que el mayor número de incendios (F_1) se registre en los días con un mayor dedicación (N_1), posteriormente la siguiente categoría en número de incendios (F_2) es la que debe poseer el segundo mayor nivel de dedicación, y así sucesivamente para cada una de las 4 categorías definidas por el modelo GD. (ver figura III.2.3.3.).

El parámetro de eficiencia (**E**) lo definimos como:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^4 (F_i \cdot N_i)}{(F \cdot 80)} \quad (\text{III.2.3.4})$$

Figura III.2.3.3. Niveles de dedicación de una estrategia diferencial frente al número de incendios.

Para ser eficaz la estrategia diferencial debe de ser $E > 1$. Será más eficaz cuanto mas mayor que 1 sea E . Imaginemos que $E = 1,12$, entonces debemos interpretar que la estrategia diferenciales un 12 % más eficaz que la horizontal.

Si en una estrategia diferencial los niveles de dedicación para un periodo de aplicación correspondiente a una campaña de incendios son N_1, N_2, N_3, N_4 . Si calculamos la Posibilidad (**P**) y es $P < 1$, significa que la estrategia diferencial es posible. Existe entonces una holgura que se interpreta como que existe una mayor disponibilidad de medios. Si al calcular después la eficacia (**E**), $E > 1$ significa que la distribución de medios es más adecuada que en una horizontal. Una vez visto que la estrategia es posible y además eficaz, se inicia un proceso de valoración para esa campaña de incendios que estamos tratando.

Se han desarrollado por este equipo investigador una serie de índices inéditos ya plasmados en otros trabajos anteriores encaminados a una valoración cualitativa de la distribución. Son los valores de dedicación para cada incendio, a los que llamaremos $R_{i,j}$, cuya expresión es la siguiente:

$$R_{i,j} = \frac{N_i}{DFR_{i,j}} \quad (\text{III.2.3.5})$$

donde N_i son los niveles de dedicación para cada tipo de día i ($i = 1, 2, 3, 4$).

$DFR_{i,j}$ es el número de incendios en los días tipo i de cada campaña de incendios j dividido entre el número de días de tipo i que hubo en dicha campaña j .

$R_{i,j}$, es la dedicación diaria por incendio para cada una de las cuatro clases de día i en una campaña determinada j .

$R_{i,j}$ nunca podrá superar el valor del nivel de dedicación N_i , ya que N_i son los medios de los que se dispone en la realidad en un día y no pueden dedicarse más por incendio. Por lo tanto, cuando $R_{i,j}$ es menor estrictamente que N_i los medios aplicados por incendio son precisamente $R_{i,j}$. Si $R_{i,j}$ es mayor o igual que N_i entonces los medios que se utilizan son exactamente N_i , ya que no se puede disponer de más.

Para las distintas clases de día i en una campaña de incendios cuanto más se asemejen los $R_{i,j}$ la distribución de los medios por incendio será más homogénea. La situación ideal sería:

$$R_{1,j} = R_{2,j} = R_{3,j} = R_{4,j} \quad (\text{III.2.3.6})$$

En esa situación ideal los medios utilizados para cada incendio son los mismos siempre. Una manera de medir la similitud entre los diferentes valores de dedicación dentro de una campaña de incendios es calcular su desviación estándar (**STD**). Cuanto menor sea STD mayor será la homogeneidad.

Fue definido STD de $R_{i,j}$ como otro índice que denominamos **índice de estrés**, es un índice de sobresalto. Cuanto más pequeño sea STD menor será el factor sorpresa porque se estarán distribuyendo los medios homogéneamente.

En análisis previos realizados por este equipo investigador, se aplicaron estrategias diferenciales en base al modelo GD para las campañas de incendios del periodo 1988-2000 en las provincias de León, Zamora y Salamanca. En dichos análisis cuantitativos fueron calculados todos estos índices y se obtuvieron resultados bastante satisfactorios. Con aquellos resultados se demostró que la estrategia diferencial se presenta en la mayoría de los casos como posible y eficaz. Además los valores de R_{ij} indicaron una tendencia hacia un reparto más adecuado de los medios en la estrategia diferencial que en la horizontal. Otras conclusiones que pudieron extraerse es que la estrategia horizontal es más inadecuada a medida que el número de incendios es más elevado, conduciendo a mayores índices de estrés, en cambio la estrategia diferencial es más útil y da mejores resultados operativos de estos índices cuando el número de incendios es mayor. Por lo tanto, la conclusión básica que se extrajo de anteriores estudios y lo que nosotros queremos dejar patente aquí es que una estrategia diferencial basada en un buen índice predictor del riesgo (como el modelo GD) es más adecuada que una horizontal en la aplicación de la lucha antifuego.

CAPÍTULO IV:

LA FÍSICA DEL FUEGO.

Hemos señalado anteriormente que el fuego, como tal proceso es materia que debe ser explicada desde las leyes de la física, en general, y de la meteorología en particular. También hemos señalado que el fuego es una dinámica vertical que va a inducir dinámicas horizontales. Otros aspectos como los relacionados al agua y sus cambios de estado, son abordados ahora en la idea que hallaremos la mejor explicación de los hechos. Aspecto muy singular a considerar en este capítulo es en relación a la determinación del *Nivel de Condensación Forzado* (LCL), constituyendo un elemento absolutamente novedoso en la bibliografía, y que viene a completar todo un diseño de un diagrama termodinámico, ya iniciado en trabajos bibliográficos anteriores por este grupo.

IV.1. El fuego como problema físico-meteorológico.

Como hemos dicho anteriormente el fuego es un proceso de combustión que tiene lugar en la discontinuidad suelo-atmósfera. Por tanto, este proceso está regido por condicionamientos físicos rigurosos. Pero, con independencia de esa rigurosidad, básica en nuestra concepción del fenómeno, hemos de pensar que el auténtico problema es explicar por qué en unas condiciones hay incendios y no los hay en otras. Está claro que existen aspectos, por muy rigurosos que sean, que inciden de forma constante temporal, pero esos no son los que nosotros buscamos. En otras palabras, hemos de buscar descripciones rigurosas de por qué sí o por qué no acontecen los incendios en un determinado lugar. Como ejemplo, hemos de convenir que el proceso de radiación, que como sabemos está regulado por las leyes de Stefan-Boltzman, Wien y Kirchhoff, es independiente (en general) de procesos meteorológicos usuales. Es decir, la radiación no debe resultar un factor crítico en el problema de la aparición o no de incendios, en un determinado día. No ocurre así con la convección, que depende de la particular estructura de la columna en un lugar e instante dado, y que dicha particular estructura es muy cambiante en sentido temporal. Esto es lo que justifica la esencia de este trabajo, elegir entre descripciones estrictas, cual es la más oportuna al caso de los incendios silvestres. Por otra parte no debe olvidarse que el estado de humedad tanto en el suelo como en la propia atmósfera van a incidir fuertemente en el problema. Recuérdese, llegados a este punto, que hemos señalado anteriormente la importancia de este aspecto, e incluso, ya hemos dejado dicho que la propia humedad del suelo depende de la humedad del aire presente y pasado. En un sentido extraordinariamente purista todo lo anterior podría resumirse en que para nosotros el auténtico problema no es el fuego sino la aparición del fuego.

IV.2. El fuego como dinámica vertical de la columna atmosférica.

De lo anterior debe interpretarse que el movimiento vertical del aire sobre el fuego es el gran aspecto a estudiar. De forma didáctica, elemental, todo el mundo sabe que si se quiere que una cinta de papel se queme, la forma más eficiente es colocarla verticalmente. Físicamente ello se corresponde con admitir el hecho de que el fuego es una dinámica vertical. Además, como hemos visto en el apartado anterior, la convección es esencialmente un mecanismo vertical en la atmósfera. En la atmósfera la convección está íntimamente ligada al concepto de estabilidad-inestabilidad en la columna. Con el razonamiento anterior no hacemos sino reforzar el punto de vista generalizado en la ciencia meteorológica de que el movimiento vertical es, doctrinalmente, un problema termodinámico.

IV.2.1. La estabilidad atmosférica: formas varias de análisis

La estabilidad (o inestabilidad) de un estrato de la columna atmosférica es una propiedad crucial en orden a explicar el comportamiento de dicho estrato, así como su evolución espaciotemporal. Por todos es bien sabido que la estabilidad de la columna atmosférica está íntimamente ligada a procesos meteorológicos importantes, tal es el caso del desarrollo cumulonímbico, etc. En otras palabras la estabilidad guarda una estrecha relación con lo que se denomina tiempo severo.

En el contexto de la investigación que aquí presentamos la estabilidad no es esencialmente el objeto a tratar pero la estrecha relación que guarda con la aparición del fuego hace indispensable que abordemos este aspecto. Algunos aspectos los trataremos de forma general, y en otros entraremos en matizaciones profundas.

Desde el punto de vista tradicional en la bibliografía la estabilidad suele ser explicada en términos del gradiente térmico vertical (GTV) que representa la tercera componente del operador gradiente. Tal componente se suele denotar por α :

$$\alpha = -\frac{\partial T}{\partial z} \quad (\text{IV.2.1.1})$$

que naturalmente presenta variaciones en el espacio y en el tiempo. Como valor medio planetario se suele considerar que α vale $0.6^\circ \text{K}\cdot\text{Hm}^{-1}$.

Si los movimientos de masas verticales los suponemos adiabáticos, hipótesis aceptada de forma universal, el valor de α entra en litigio con el denominado gradiente adiabático vertical γ .

El Gradiente Adiabático Vertical γ es la variación de temperatura con la altura que sufre una parcela de aire que asciende adiabáticamente en la atmósfera y es de valor constante:

$$\gamma = -\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{g}{C_p} = \frac{9,8}{1012} \left[\frac{m \cdot s^{-2}}{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}} \right] \approx 1 \text{ } ^\circ K \cdot Hm^{-1} \quad (IV.2.1.2)$$

siendo C_p el calor específico del aire seco a presión constante $1012 \text{ } J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ y T la temperatura en grados K .

Como bien se sabe la hipótesis de adiabaticidad se deriva del hecho de que los movimientos son lo suficientemente rápidos como para que el flujo neto de calor entre la masa que asciende y la masa del entorno sea nulo.

Si inicialmente aceptamos que el aire es seco, esto es, que los estados de la masa que asciende están alejados de procesos de saturación, la posibilidad de que una masa ascienda está asociada a la condición $\alpha > \gamma$. Que físicamente viene a significar que la masa decrece en temperatura menos de lo que decrece la temperatura del aire circundante. Esta situación se conoce en meteorología operativa como situación de gradiente superadiabático. Si esta condición se da, el ascenso de masas es inmediato.

Otra forma clásica de describir el movimiento vertical lo es en términos de la denominada temperatura potencial (θ). La temperatura potencial, asociada al nivel bórico de 1000 hPa viene a cerrar un compromiso en la diada (P,T) de todos los estados que conectan adiabáticamente con el estado (1000, θ). La expresión o ligadura de Poisson que define la temperatura potencial es:

$$\theta = T \cdot \left(\frac{P}{1000} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (IV.2.1.3)$$

donde T es la temperatura al nivel de presión P , R es la constante de los gases ideales y C_p el calor específico del aire seco a presión constante.

Fijado un estado (P , T), queda definida su temperatura potencial.

La capacidad de ascenso adiabático de una masa tendrá carácter θ -constante, y la masa ascenderá cuando se dé la condición de que $\frac{d\theta}{dz} < 0$.

Nótese que aunque el ascenso adiabático puede ser explicado en términos de gradientes o de temperaturas potenciales, con las mismas conclusiones, desde un punto de vista filosófico, el uso de la temperatura potencial conlleva mayor riqueza conceptual.

En la tabla IV.2.1.1, más adelante, se exponen las posibilidades de ascenso adiabático.

Una forma más novedosa y, sin duda, mucho más rica en significado físico de explicar la dinámica vertical lo es en términos del denominado potencial de Montgomery o energía estática seca (S), tal potencial viene dado por la expresión:

$$C_p \cdot T + gz = S \left[\frac{J}{kg} \right], \quad (IV.2.1.4)$$

siendo C_p el calor específico del aire seco a presión constante $1012 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, T la temperatura en grados K, g la aceleración de la gravedad y z la altitud en m.

Como todo potencial es una energía por unidad de causa, entendiendo por causa la unidad de masa en este caso. De la definición puede observarse que S es invariante en evoluciones adiabáticas, de tal manera que una masa que asciende adiabáticamente mantiene su potencial.

$$\frac{dS}{dz} = C_p \cdot \frac{dT}{dz} + g$$

en ascenso adiabático $\frac{dT}{dz} = \frac{-g}{C_p}$, luego $\frac{dS}{dz} = C_p \cdot \frac{-g}{C_p} + g = 0 \quad (IV.2.1.5.)$

Si una atmósfera fuera construida adiabáticamente en sentido planetario el potencial S valdría lo mismo en todos los puntos de la atmósfera planetaria. Naturalmente la realidad dista de ese comportamiento presentando el potencial una distribución planetaria radial creciente. Esta distribución del potencial creciente con la radial exterior planetaria nos viene a recordar, por similitud, la distribución de los electrones en la corteza de un átomo. Esta similitud se va a mantener con aspectos dinámicos que mencionaremos más adelante. Para una representación local (suelo horizontal) S presenta un incremento en sentido ascensional. (ver figura IV.2.1.1).

Según la pendiente ascensional sea mayor el estrato será tanto menos estable, en particular, la tangente del ángulo β indicará la variación de S frente a p . Para $\beta=0$ tendremos un estrato adiabáticamente neutro. Para el caso de β menor que cero el estrato es absolutamente inestable. Este ángulo β , así definido, viene a representar el

parámetro de estabilidad que usamos en el contexto del fuego. A menor β mayor inestabilidad. Un parámetro similar es usado por Arakawa y Schubert (1974) en la bibliografía.

Fig. IV.2.1.1. Esquema energético de situación atmosférica estable.

El interés de usar el potencial de Montgomery es que permite conectar dimensionalmente con la mayoría de los procesos físicos que pudieran acontecer en la atmósfera. La razón es obvia, todo proceso físico está descrito energéticamente, y estándolo también la estabilidad en esa forma, la conexión resulta inmediata.

En la tabla IV.2.1.1. se resume la condición de estabilidad (inestabilidad) en las tres variedades descritas: gradientes, temperatura potencial y potencial de Montgomery.

Tabla IV.2.1.1. Estados de la columna atmosférica según tres criterios de estudio.

	Estabilidad	Inestabilidad Absoluta	Indiferencia Adiabática
Gradiente térmico vertical y gradiente adiabático	$\alpha < \gamma$	$\alpha > \gamma$	$\alpha = \gamma$
Temperatura Potencial	$\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$
	$\frac{\partial \theta}{\partial p} < 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial p} > 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial p} = 0$
Potencial de Montgomery	$\frac{\partial S}{\partial z} > 0$	$\frac{\partial S}{\partial z} < 0$	$\frac{\partial S}{\partial z} = 0$
	$\frac{\partial S}{\partial p} < 0$	$\frac{\partial S}{\partial p} > 0$	$\frac{\partial S}{\partial p} = 0$

IV.2.2. Estabilidad y dinámica vertical

Muchas aplicaciones han sido expuestas en torno al potencial de Montgomery en trabajos anteriores (García Díez et al. 1987, 1988), por lo que aquí vamos a hacer hincapié en algunos aspectos directamente ligados al problema del fuego.

El ejemplo inmediato es considerar lo que ocurre cuando el nivel inferior de un estrato estable está sometido a un calentamiento (lo que puede suceder en un incendio).

En la figura IV.2.2.1 consideramos el caso en el que el estrato 850-700 hPa, que es estable ($\beta > 0$), es sometido en su nivel inferior a un calentamiento, de tal suerte que el valor de S en dicho nivel pasa a ser S' ($S' > S_{850}$). Por la acción del calentamiento, la temperatura de la burbuja es superior a la del entorno, por lo que también es mayor su potencial de Montgomery (S'). Y en consecuencia la burbuja ascenderá y lo hará justo hasta situarse en el nivel bórico P que es el que presenta el valor de dicho potencial de Montgomery S' . Si la burbuja sobrepasase dicho nivel se encontraría rodeada de un entorno de mayor potencial de Montgomery por lo que la burbuja descendería. La solución estacionaria es, por lo tanto, que la burbuja terminaría en el nivel P .

Fig. IV.2.2.1. Perfil energético de una columna vertical en situación de estabilidad

Otra aplicación inmediata de esta representación que no ha sido abordada en ningún trabajo anterior, es analizar lo que ocurre cuando la burbuja del nivel de 850 hPa es forzada por empuje dinámico (viento y orografía) a ascender adiabáticamente. Esto

como se sabe es lo que ocurre en las laderas de barlovento. A medida que una burbuja asciende adiabáticamente el Potencial de Montgomery S se mantiene constante.

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dz} &= C_p \cdot \frac{dT}{dz} + g \\ \frac{dS}{dz} &= C_p \cdot \frac{-g}{C_p} + g = 0\end{aligned}\quad (\text{IV.2.2.1.})$$

Si la burbuja asciende adiabáticamente mantendrá constante su potencial de Montogómery (S_{850}), de tal manera que si por el mencionado ascenso forzado alcanzara el nivel bórico P , se encontraría rodeada de burbujas con mayor potencial, y ello indicaría que, si la burbuja ascendente se encontrara en ese nivel, es debido única y exclusivamente al forzamiento dinámico. Lo que es interesante a destacar es que entre más alto sea el nivel que alcance la burbuja ascendente sobre la ladera, más déficit de potencial con respecto al entorno tiene. En otras palabras, ascender los primeros 50 metros por la ladera no requieren la misma energía cinética que los segundos, lo cual pone bien a las claras que el ascenso forzado por barlovento es progresivamente frenado por la acción del déficit del potencial de la burbuja ascendente respecto al entorno. Además, si en un momento dado dejara de existir el viento que produce el forzamiento, se organizaría una corriente descendente decelerada, esto es, la burbujas que más se hubieran elevado sobre la ladera empezarían a descender con una aceleración muy alta que progresivamente se iría reduciendo alcanzando el nivel original (850 hPa) con una aceleración nula.

Este proceso explicado genéricamente resulta de gran importancia en los procesos de fuego de ladera porque, ya podemos intuir que si el calentamiento producido por el fuego en la base de una ladera fuese constante, el fuego progresaría ladera arriba pero cada vez lo haría más despacio.

Vamos a plantear analíticamente este problema suponiendo que el calentamiento que provoca S' es el debido a un incremento de temperatura. En consecuencia:

$$S' = Cp(T_{850} + \Delta T) + gz_{850} \quad (\text{IV.2.2.2.})$$

y dado que:

$$S_{850} = CpT_{850} + gz_{850} \quad (\text{IV.2.2.3.})$$

S' resulta:

$$S' = S_{850} + Cp\Delta T \quad (\text{IV.2.2.4.})$$

Si nos centramos en la representación gráfica de la figura IV.2.2.1 podemos definir la tangente del ángulo β como:

$$\text{tg}\beta = \frac{S_{700} - S_{850}}{850 - 700} = \frac{e}{150} \quad (\text{IV.2.2.5.})$$

que también equivale a:

$$\text{tg}\beta = \frac{S' - S_{850}}{850 - P} \quad (\text{IV.2.2.6.})$$

Igualando ambas expresiones:

$$\frac{S' - S_{850}}{850 - P} = \frac{e}{150} \quad (\text{IV.2.2.7.})$$

y sustituyendo S' resulta

$$\frac{e}{150} = \frac{Cp\Delta T}{850 - P} \quad (\text{IV.2.2.8.})$$

El nivel P alcanzado por la burbuja ascendente es:

$$P = 850 - \frac{150Cp\Delta T}{e} \quad (\text{IV.2.2.9.})$$

Que en dimensiones y unidades es:

$$P[hPa] = 850[hPa] - \frac{150[hPa] \cdot 1012 \left[\frac{J}{kg^\circ K} \right] \cdot \Delta T[^\circ K]}{e \left[\frac{kJ}{kg} \right] \cdot 1000} \quad (\text{IV.2.2.10.})$$

Tal nivel P lo denominamos **nivel de penetración vertical del fuego** y en la figura IV.2.2.2 se presentan los niveles de penetración para distintos grados de calentamiento y distintas configuraciones de estabilidad.

Así por ejemplo puede observarse que para un calentamiento de 5°C en una configuración de estabilidad de 3 kJ/kg el nivel de penetración es de 600 hPa .

Figura. IV.2.2.2. Distintos niveles P de penetración vertical para diferentes valores de e e incrementos de temperatura en 850 hPa .

Una cuestión que podría ser debatida es si el incremento de temperatura depende o no del tipo de combustible que se está quemando, pero no hay debate en relación al valor de la estabilidad. La dependencia con respecto a e debe interpretarse como universal, esto es, cumpliéndose en cualquier lugar y época para cualquier tipo de combustible. Volviendo al debate sobre la posible influencia sobre el incremento de temperatura del material combustible, se debe matizar que posiblemente influya más la velocidad de combustión que el propio calor liberado. Queremos decir con ello que el calor liberado produce un aumento de temperatura del aire adyacente provocando su ascenso casi de forma instantánea, ascendiendo este aire con una energía cinética dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \propto \Delta S = S' - S_{850} = C_p \Delta T \quad (\text{IV.2.2.11.})$$

El hecho que el calor de combustión sea mayor en un combustible que en otro, se va a traducir en que la masa ascendente será mayor en cantidad y, por la ecuación de continuidad, se forzará una convergencia horizontal más fuerte. En otras palabras, el hecho de que el combustible presente más exoenergía va a ser, principalmente, causa de un mayor viento.

En definitiva, el nivel de penetración es importante en el problema del fuego ya que en función de la estabilidad de la columna en el lugar, el aire caliente ascenderá más o menos. La altura de las llamas va a depender, para un combustible y suelo dados, de este nivel de penetración de forma exclusiva. A modo de ejemplo presentamos en la tabla IV.2.2.1 los niveles de penetración para diferentes calentamientos durante el denominado incendio de Guadalajara acontecido en julio de 2005.

Tabla IV.2.2.1. Niveles de Penetración para diferentes incrementos de T durante el episodio del incendio de Guadalajara 2005. Nivel de penetración Vertical en hPa.

Día	estabilidad e	Incrementos de temperatura									
		ΔT 1°	ΔT 2°	ΔT 3°	ΔT 4°	ΔT 5°	ΔT 6°	ΔT 7°	ΔT 8°	ΔT 9°	ΔT 10°
14	1	707	564	421	278	135	-	-	-	-	-
15	2	778	705	633	560	488	415	343	270	198	126
16	2	772	694	615	537	459	381	302	224	146	68
17	6	825	799	774	749	723	698	673	647	622	596
18	5	822	794	766	738	711	683	655	627	599	571
19	7	830	810	789	769	749	729	708	688	668	648
20	3	796	743	689	635	581	528	474	420	366	313
21	1	675	500	324	149	-	-	-	-	-	-
22	2	782	714	646	578	510	442	374	306	238	170
23	3	800	749	699	649	599	548	498	448	398	347
24	2	773	696	620	543	466	389	312	236	159	82

25	4	808	766	724	682	639	597	555	513	471	429
26	3	793	736	679	621	564	507	450	393	336	279
27	3	805	759	714	668	623	577	532	486	441	396
28	6	823	796	770	743	716	689	662	635	609	582

En dicha tabla se presentan los niveles de penetración asociados a la estabilidad real que hubo en dichos días (sondeos de Barajas) para diferentes grados de calentamiento 1-10 ° C. La razón de expresar diferentes grados de calentamiento es que en un incendio real hemos de considerar los diferentes tipos de combustibles que entran en juego. A este respecto, Silvani y Morandini (2006) establecen que un suelo de escobas es el que proporciona mayor altura de llamas.

De acuerdo a la tabla, puede observarse que las menores estabilidades acontecieron los días 14 y 21. El incendio, como se sabe, comenzó en las horas centrales del día 16, y se caracterizó por su extraordinaria duración. Puede observarse como, entre otros, el día 21 resultó ser un día absolutamente duro para la extinción del fuego.

Otro aspecto del movimiento vertical importante es el estudio de la aceleración ascendente de una burbuja caliente. Este problema se aborda tradicionalmente en todos los tratados de termodinámica de la atmósfera por lo que aquí sólo vamos a matizar algunas cuestiones muy importantes al problema del fuego.

Una burbuja caliente (calentada por ejemplo por un incendio) sufre un empuje ascendente arquimedianamente opuesto al peso de la burbuja, que de acuerdo a la segunda ley de Newton establece una aceleración:

$$a = g \frac{(\rho - \rho')}{\rho'} \quad (\text{IV.2.2.12})$$

Si consideramos el aire como un gas perfecto la ecuación anterior puede escribirse en términos de potenciales de Montgomery como:

$$a = g \frac{S' - S}{C_p T} \quad (\text{IV.2.2.13})$$

En la que S' , S y T son los potenciales de Montgomery de la burbuja, del ambiente, y temperatura de ese ambiente respectivamente. Dicha expresión nos permite calcular la aceleración con la que una burbuja asciende para un calentamiento dado. Puede observarse, como curiosidad, que para un calentamiento dado, esto es, fijado $S'-S$, la aceleración es mayor en dominios fríos. Bien pudiera ser esta una de las causas de que en épocas paleoclimáticas frías acontecieran episodios generalizados y extremos de fuego (Verardo and William 1996). En este sentido, un calentamiento global del planeta no debería conducir a una mayor frecuencia de fuego incontrolado sino, más bien, a todo lo contrario.

Como hemos señalado, la expresión IV.2.2.13 puede ser evaluable en cualquier nivel de presión (altitud). Un alto valor de la aceleración viene a significar el disparo del aire caliente en el nivel inmediatamente superior al fuego. Pero si ello presenta alto interés en lo que podríamos denominar el “tiro del fuego”, no menos interés presenta conocer como va a variar esa aceleración en la elevación progresiva de la burbuja. La variación de esta aceleración con la altura vendrá dada por:

$$\frac{da}{dz} = \frac{g}{C_p} \frac{d}{dz} \left[\frac{S'-S}{T} \right] \quad (\text{IV.2.2.14.})$$

En dicha ecuación S' resulta constante si admitimos la adiabaticidad del ascenso de la burbuja. Naturalmente en condiciones reales y para calentamientos muy intensos la hipótesis de adiabaticidad se hace frágil, debiéndose entender que S' va a disminuir. Esta posibilidad no la vamos a contemplar para mayor sencillez de los cálculos.

La expresión IV.2.2.14. puede ser estimada realmente en forma numérica para una columna particular dada, ya que la información de los sondeos suele ser suficientemente densa. De esta manera podemos evaluar $a(z)$ para diversos niveles z por encima del fuego. Los resultados pueden ser:

- A- Que $a(z)$ decrezca con la altura: La burbuja ascendente subirá con aceleración decreciente positiva hasta encontrar el nivel de equilibrio.
- B- Que $a(z)$ se mantiene constante con la altura: La burbuja asciende con un movimiento uniformemente acelerado.
- C- Que $a(z)$ aumente con la altura. En este caso tendríamos una situación sumamente curiosa ya que la burbuja, que inicialmente asciende por el

calentamiento, va a ver reforzada su aceleración por el entorno (frío). Si suponemos los niveles de 850 y 700 hPa las aceleraciones respectivas vendrían dadas por:

$$\begin{aligned} a_{850} &= \frac{g}{Cp} \left[\frac{S' - S_{850}}{T_{850}} \right] \\ a_{700} &= \frac{g}{Cp} \left[\frac{S' - S_{700}}{T_{700}} \right] \end{aligned} \quad (\text{IV.2.2.15.})$$

Nótese que a_{850} será mayor, menor o igual que a_{700} , no sólo en razón a las diferencias de potencial (numeradores), sino a dichas diferencias de potencial relativas a las diferentes temperaturas. Lo normal es que $S' - S_{850}$ sea mayor que $S' - S_{700}$, pero también hay que considerar que T_{850} es mayor que T_{700} con lo que el resultado puede ser variable. En particular y como ejemplo, el caso del día 16 de julio de 2005 (episodio de fuego en Guadalajara) con radiosondeo de Madrid aporta los resultados: $a_{850} = 3.24 \text{ m/s}^2$ y $a_{700} = 3.34 \text{ m/s}^2$. Es decir, la condición de aceleración creciente con la altura se dio ese día. Desde el punto de vista físico este hecho, que nunca jamás había sido abordado bibliográficamente, nos presenta la idea de un “Supertiro”, que sin duda se daría en situaciones de fuego severo. Podría decirse que la burbuja ascendente se ve bi-impulsada, por el propio fuego de un lado, y de la propia estructura superior de la atmósfera de otro. Resulta lógico pensar que en estas condiciones de “Supertiro” la altura de las llamas será muy apreciable.

El problema de la variación vertical de la aceleración resulta ciertamente importante, tal y como se ha señalado, porque podría ser una buena forma de indagar la posibilidad de que un incendio en plena fase madura pudiera deformar la estructura atmosférica del entorno. En este sentido Jenkins (2002) aborda este problema en términos de la estabilidad y concluye que los días de más baja estabilidad son en los que el fuego provoca una mayor deformación en la atmósfera del entorno. Como patrones ella elige determinados niveles de estabilidad que, trasvasados a nuestro esquema de variación vertical de aceleraciones, se corresponden con lo que hemos denominado condiciones de “Supertiro”.

IV.2.3. Conexión con la dinámica horizontal

Hemos mencionado el hecho de que el fuego es esencialmente una dinámica vertical, y como es bien sabido, ello implica una dinámica horizontal. La Conexión formal entre ambas dinámicas viene dada por la conocida Ecuación de Continuidad. Esta ecuación en su forma más reducida nos habla de un flujo no divergente ($\nabla \cdot \vec{v} = 0$), implicando que una divergencia vertical positiva debe estar asociada a una divergencia horizontal negativa (convergencia).

Fig. IV.2.3.1. Esquema de un proceso de convergencia en superficie

Para el problema del fuego la divergencia vertical está asociada a la ascendencia de la burbuja caliente. Con lo cual debe establecerse un viento horizontal dirigido hacia el incendio. Para un suelo horizontal isotrópico ese viento tendría dirección radial interior hacia el foco. (Ver figura IV.2.3.2.).

Fig. IV.2.3.2. Esquema en Planta de la convergencia horizontal generada por el foco de un incendio en un punto de la superficie en isotropía.

Curiosamente esta convergencia isotrópica no haría progresar horizontalmente el fuego en una dirección particular, limitándose a aportar oxígeno al combustible, y el fuego cesará cuando el combustible se haya consumido. En otras palabras, en condiciones de isotropía absoluta el fuego tendría carácter transitorio. Evidentemente la realidad dista mucho de tal comportamiento isotrópico. Suelo y viento sinóptico, externo al generado por el incendio, vendrán a establecer una anisotropía que defina una dirección particular de propagación.

IV.3. El viento como factor influyente en la dinámica del fuego

En otro sentido la dinámica horizontal juega un papel muy importante en relación al problema del fuego, y ello será matizado en el capítulo VII, pudiendo aquí avanzar que el viento, entendido como un mecanismo de transporte, puede traer al lugar una masa atmosférica de estructura vertical distinta a la inicial y de naturaleza muy diferente en cuanto a humedad se refiere. No vamos aquí a entrar en un estudio pormenorizado de vientos, pero el modelo geostrófico nos resultará suficiente para el análisis meteorológico del fuego.

El viento geostrófico se sabe es la aproximación más sencilla.

La expresión del viento geostrófico nace como consecuencia de buscar una solución a la ecuación de movimiento de la unidad de masa de aire, esto es:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + f\vec{k} \wedge \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla}_z P, \quad (\text{IV.3.1})$$

que represente un movimiento rectilíneo uniforme. En tal caso la variación temporal del vector velocidad es intrínsecamente nula (vectorial y escalarmente), adquiriendo la expresión anterior la forma:

$$f\vec{k} \wedge \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla}_z P. \quad (\text{IV.3.2})$$

Como podemos ver dicho viento existe, denotándose como $\mathbf{V}_g$ dado por:

$$\vec{V}_g = \frac{1}{\rho f} \vec{k} \wedge \vec{\nabla}_z P \quad (\text{IV.3.3})$$

Su disposición vectorial se muestra en la figura IV.3.1.

Fig. IV.3.1. Disposición vectorial en el viento geostrófico.

Naturalmente, existen otras aproximaciones al viento real (gradiente, ciclostrófico, etc). Como hemos mencionado antes, el viento geostrófico podrá actuar de mecanismo de transporte de masas, constituyendo éste un aspecto de apreciable importancia en el problema del fuego, como abordaremos en el capítulo VII.

IV.4. La humedad atmosférica: Su determinación e importancia

El agua es un componente minoritario en la composición del aire atmosférico. Sin embargo el papel que juega en el comportamiento atmosférico, derivado de los procesos de cambio de fase, es de excepcional importancia. No en vano hay cierta corriente de naturalistas que dicen que nuestro planeta debería haberse llamado “*Agua*”. Pero si como hemos dicho, la importancia del agua se deriva de la posibilidad de cambios de estado, habrá que determinar de forma bien precisa en qué condiciones espaciotemporales se producen dichos cambios de fase.

Para empezar, un problema nada trivial es usar un índice que nos exprese el contenido de agua en una masa de aire. Pero más allá de la expresión del simple contenido, es importante que nos represente además dicho contenido considerando las posibles evoluciones de esa masa. A tal respecto es evidente que la mejor forma de representar el contenido de vapor de agua en una masa de aire es referirlo a la unidad de masa de dicho aire. En otras palabras, interesa al problema el uso de índices de humedad de

naturaleza másica. Y tal es el caso de la denominada humedad específica (**q**) y de la proporción de mezcla (**x**). La humedad específica viene expresada por la masa (kg) de vapor de agua que hay en un kg de aire (aire seco más vapor de agua). La proporción de mezcla viene dada por la masa (kg) de vapor de agua que hay en un kg de aire complementario (aire seco).

Queda por tanto claro que si una unidad de masa de aire evoluciona de forma cerrada (sin flujo de masa con el exterior), la humedad específica permanecerá constante. Por evidente que este planteamiento resulte es muy elevado el número de autores que siguen propugnado índices de humedad que no presentan la propiedad anterior, derivándose de ello considerables imprecisiones. No es casualidad, por tanto, que en todos los tratados de meteorología se use **q**.

Algunos índices usados son por ejemplo la humedad relativa (**R**) y la humedad absoluta (**A**):

$$R = \frac{q}{q^*} \cdot 100 \quad (\text{IV.4.1.})$$

$$A = \frac{\text{vaporH}_2\text{O}}{\text{Vaire}} \quad (\text{IV.4.2.})$$

En relación a la humedad relativa, como puede observarse la mayoría de las evoluciones de masa conceptualmente usadas en meteorología (adiabáticas, isotermas, isobáricas etc) no contemplan la posibilidad de constancia de **R**. De ahí la pobreza conceptual de dicho parámetro. Lo mismo puede señalarse respecto a la denominada humedad absoluta (**A**).

Como se sabe **q** presenta un límite superior denominado humedad específica saturante (**q***) que viene a representar el valor máximo de la masa de vapor en la unidad de masa de aire compatible con el estado termodinámico de dicha masa (condiciones p,T). Dicha humedad específica saturante (**q***) depende exclusivamente de las condiciones (p, T) y dicha dependencia se deriva de la ecuación de Magnus.

En nuestro caso resulta interesante definir el denominado déficit de saturación (**D**), dado por **q*-q**, que viene a representar el complemento de masa de vapor que una masa requiere para que **q** alcance el valor de **q***.

Existen otros indicativos de humedad muy útiles en meteorología como son la temperatura de termómetro húmedo y la denominada temperatura del punto de rocío, sobradamente conocidos en la bibliografía. Es importante sin embargo resaltar aquí, la riqueza conceptual que conlleva la temperatura del termómetro húmedo (T'), aspecto sobre el cual nos manifestaremos más adelante.

En relación al denominado potencial de Montgomery (S), ya definido para el aire seco:

$$C_p \cdot T + gz = S \left[\frac{J}{kg} \right], \quad (IV.4.3)$$

podemos considerar ahora además las denominadas energías estáticas húmeda y saturante en los términos:

$$C_p \cdot T + g \cdot z + L \cdot q = h \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (IV.4.4)$$

$$C_p \cdot T + g \cdot z + L \cdot q^* = h^* \left[\frac{J}{kg} \right], \quad (IV.4.5)$$

donde L es el calor latente de cambio de estado $2,5 \cdot 10^6$ J/kg.

Desde el punto de vista estricto de la termodinámica de la atmósfera resulta obvio demostrar las propiedades:

- 1- Si una burbuja (unidad de masa) evoluciona de forma cerrada y adiabática, sin que acontezca cambio de fase alguno, mantiene simultáneamente, la conservación de S y de h. S por ser la evolución adiabática y h por ser cerrada. Pero medítese que la constancia de h no es la constancia de la suma de S y $L \cdot q$, sino es la constancia de suma de constantes. Tanto S como $L \cdot q$ son constantes. Naturalmente la simple constancia de h podría interpretarse en un sentido de intercambio energético entre S y $L \cdot q$, pero es a ello a lo que precisamente no nos estamos refiriendo aquí. Naturalmente la propiedad mencionada sólo se da en ámbitos alejados de la saturación.

- 2- Una unidad de masa de aire en la que ficticiamente el vapor de agua condensa pasa a tener una *temperatura equivalente* mayor que su temperatura inicial según la expresión:

$$T_{eq} = T + \frac{Lq}{C_p} \quad (\text{IV.4.6})$$

La energía equivalente S_{eq} de esa unidad de masa es exactamente la energía estática húmeda que posee la masa en su estado inicial:

$$S_{eq} = C_p T_{eq} + gz = h = C_p T + gz + Lq \quad (\text{IV.4.7})$$

- 3- Para que el vapor de agua inicial contenido en la unidad de masa de aire condense, llegándose a q^* y conservándose la energía de la unidad de masa, se ha reducido su temperatura a una T' :

$$h = C_p T + gz + Lq = C_p T' + gz + Lq^*(T') \quad (\text{IV.4.8})$$

$$T' < T$$

Donde T' es la temperatura del *termómetro húmedo*.

Como hemos señalado anteriormente en este trabajo la naturaleza vertical dinámica del fuego va a entrar en litigio con la estructura vertical atmosférica, y en general, con los procesos verticales que pudieran acontecer. Como quiera que en la dinámica vertical atmosférica el papel jugado por el vapor de agua presenta una importancia excepcional, vamos a permitirnos analizar algunos aspectos profundos de esta materia.

Como se sabe el estudio vertical de la atmósfera se realiza según representaciones gráficas que son conocidos como diagramas aerológicos. En todo caso los diagramas aerológicos son considerados sobre información real dada por los radiosondeos atmosféricos, que de forma estándar se realizan a las 00:00 horas y a las 12:00 de forma universal. Desde el punto de vista operativo tal conjunto de estaciones y datos se conocen como la información TEMP.

IV.5. Los Diagramas aerológicos: herramienta del estudio meteorológico del fuego

Los diagramas aerológicos son representaciones gráficas que representan estados y evoluciones termodinámicas en sentido vertical. Los estados vienen definidos por la diada (p,T) y definen la denominada curva de estado. Por tal razón todos los diagramas contemplan como ejes funciones de la presión y de la temperatura, siendo el eje de ordenadas el asociado a la presión en sentido decreciente para mayor comodidad visual. En cuanto a la temperatura, pueden usarse isolíneas que pueden no corresponderse con las abscisas. Otro aspecto importante común a todos los diagramas es la representación de los índices de humedad en cada nivel bórico y, en este sentido, el índice usado suele ser la humedad específica q . Además de ello en todos los diagramas son representadas evoluciones termodinámicas que se asumen como reales en la atmósfera, particularmente las evoluciones adiabáticas (de aire seco y aire saturado).

Para la perfecta comprensión de la estructura vertical de la atmósfera y los procesos verticales que pudieran acontecer, se acepta unánimemente que:

- A- Los estados y las evoluciones que comprendan el mantenimiento del agua en fase de vapor (exclusivamente), se denominan procesos adiabáticos secos. Normalmente una burbuja en superficie no está saturada y si evoluciona verticalmente tendrá que recorrer un espacio vertical hasta que, por razón de enfriamiento, alcance la saturación. Ese ascenso se considera como un proceso de aire seco.
- B- El propio proceso de ascenso se considera adiabático en razón a que se asume que el movimiento ascensional es lo suficientemente rápido como para que no haya intercambio de calor con el aire circundante. Así mismo, se considera que la rapidez de ese movimiento es la suficiente como para que tampoco haya flujo de masa de los componentes del aire que asciende, particularmente del vapor de agua. En definitiva, ese ascenso es un proceso adiabático y cerrado para la burbuja que asciende.
- C- Alcanzada la condición de saturación, sólo va a persistir en la burbuja el vapor de agua correspondiente a la humedad específica saturante, ésta compatible con la presión y temperatura de los estados correspondientes, condensándose el

exceso de vapor resultante. El calor de condensación de cada gramo de vapor que vaya condensándose es absorbido, estrictamente hablando, por el aire circundante de la burbuja y por la gota de agua líquida producida. El problema generado por la gota de agua producida, el calor que ésta percibe, y el abandono de la burbuja, como flujo de masa que es, plantean severas dificultades a la hora de describir la evolución adiabática, por lo que es aceptado por toda la bibliografía que la gota de agua producida no va a perturbar la adiabaticidad en la evolución de la burbuja del aire. En otras palabras la gota de agua producida abandona la entidad sin alteración energética para el resto de la burbuja. Tal hipótesis nos aleja de una descripción estricta, pero nos supone una gran comodidad en sentido operativo. Tal proceso, que no es estrictamente adiabático por las razones apuntadas, es denominado en la bibliografía proceso pseudoadiabático.

Los diagramas termodinámicos usualmente se suelen clasificar en diagramas particulares y emagramas, refiriéndose estos últimos a que el área elemental del diagrama tenga dimensiones de energía. En termodinámica los diagramas más conocidos son como se sabe los de Clapeyron y Kelvin. Pues bien, ambos son emagramas porque, como bien se sabe las áreas elementales en dichos diagramas representan trabajo o calor. Sin embargo, por razones de comodidad se suelen aceptar los diagramas que no son emagramas, y tal es el caso del diagrama más usado que es el conocido diagrama de Stüve. Otros diagramas bien conocidos son los diagramas de Neuhoff, Refsdal, etc.

En este trabajo siguiendo la tradición del grupo investigador no se usan ninguno de los diagramas anteriores y en cambio se hace la descripción en términos de la variación vertical de las energías estáticas (seca, húmeda y saturante) definidas anteriormente. Naturalmente, las conclusiones físicas deben ser independientes de la representación particular que se adopte, pero siendo ello cierto, también lo es que hay representaciones de más fácil interpretación para cada caso. En nuestro caso, el problema del fuego, la representación de energías estáticas resulta muy apropiada. A tal efecto un esquema ordinario elemental de nuestro diagrama se presenta en la figura IV.5.1.

Figura. IV.5.1 Diagrama energético S(P) con niveles estándar. Día 5 de agosto de 2006, radiosondeo de las 00:00 h. La Coruña.

En tal esquema puede verse una evolución casi lineal creciente con la altura de S, y evoluciones variables de h y h*. Mientras la separación entre las curvas h y S nos da una idea del estado higrométrico de la columna, la existente entre h* y h nos la da del déficit de saturación que existe en dicha columna. Por ultimo la separación entre h* y S nos daría una idea de la energía asociada a una columna atmosférica totalmente saturada.

Este diagrama ha sido muy usado por este grupo investigador y plasmado en variadas aplicaciones recogidas en la bibliografía, Arakawa y Schubert (1974), Lord y Arakawa (1980), Rivas Soriano y García Díez (1993), y Rivas et al (1994). Pero ello no es óbice para que aquí, dada la importancia que ello tiene para nuestro problema del fuego, indaguemos aspectos novedosos y, en tal sentido vamos a presentar aquí una novedad, cual es la determinación del Nivel de Condensación Forzado (LCL). Más adelante precisaremos este aspecto.

En relación a la figura IV.5.1. en este trabajo se recogen de forma exhaustiva todos los sondeos diarios a las 00:00 h en La Coruña correspondientes a la época estival del periodo 1998-2006. Los resultados pueden visualizarse en el anexo I.

IV.6. La convección y el fuego

Sobre un diagrama de Stüve el análisis convencional de la estructura atmosférica se realiza cuando son consideradas la curva de estado (p,T) y la curva de las temperaturas del punto de rocío. Tal y como se presenta en la figura IV.6.1.

Para una burbuja de superficie podemos suponer dos tipos de elevación. La hipótesis más sencilla es que la burbuja ascienda de forma cerrada y en equilibrio térmico con el aire circundante (condición umbral de ascenso). Al irse adentrando en sentido vertical la burbuja, alcanzará un nivel denominado nivel de condensación convectivo (CCL), en el que la humedad específica que mantiene la burbuja desde su estado inicial se convierte en la humedad específica saturante correspondiente a dicho nivel. Si la burbuja sobrepasa dicho nivel es conminada a que progresivamente el vapor de agua vaya condensándose. En definitiva, el proceso de condensación tiene lugar por encima del CCL. Pero para que ello acontezca, la burbuja que asciende adiabáticamente debe alcanzar en el estado inicial la temperatura conveniente asociada a la temperatura potencial del CCL, denominándose tal temperatura, temperatura de disparo (T_{DI}). Esta hipótesis de calentamiento es realista en aquellos lugares donde la actividad solar sea apreciable y, por ello, es tradicional admitir que el CCL define la base de la nubosidad cumuliforme en zonas mesetarias.

La segunda hipótesis de ascenso es suponer que la burbuja asciende de forma adiabática y cerrada desde su estado inicial, es decir, asciende por la adiabática seca correspondiente al nivel del suelo manteniendo su humedad específica. Dicha elevación adiabática va a definir temperaturas de la burbuja en general inferiores a las del aire circundante, por lo que es evidente que dicho ascenso es altamente improbable a menos que dicha burbuja se vea forzada a ascender por requerimientos mecánicos. Y tal es el caso precisamente de lo que acontece en las laderas de barlovento en las que el viento horizontal llega a la base de la ladera y se ve forzado a ascender sobre ella. Mientras exista ladera, dicha posibilidad de ascenso (adiabático y cerrado) puede darse y, en dicho caso se alcanzaría un nivel denominado nivel de condensación forzado (LCL) en el que la temperatura de la burbuja sería la apropiada para que la humedad específica que lleva la burbuja sea la saturante.

Figura IV.6.1. Descripción de los niveles de condensación en un Diagrama de Stüve. La línea roja continua representa a la curva de estado. La línea azul continua representa las temperaturas de rocío.

Nótese que el LCL se alcanza por la existencia de viento y de ladera, y también debe apreciarse que el LCL no es un punto correspondiente a la curva de estado. En tales circunstancias la burbuja ascendente forzada regresaría al nivel inferior de la ladera si el viento cesase, o también, si terminara la ladera. Es muy importante señalar que aunque la condensación tenga lugar de forma progresiva con el ascenso sucesivo de la burbuja, aún computándose el calor desprendido por la condensación la burbuja sigue estando más fría que el entorno, por lo que, aún condensada no tiene capacidad propia de ascenso requiriéndose el viento y la ladera para su ascenso. Pero tal requerimiento podría desaparecer si la burbuja alcanzara el denominado nivel de libre convección (LFC), a partir del cual la burbuja ascendería de *motu proprio*, la nube formada tendría una base forzada en el LCL y otra base, puramente termodinámica, en el LFC. En definitiva si la montaña tiene justo la altura correspondiente al LFC, todo quedaría en un ascenso forzado de aire claro entre el suelo y la altura correspondiente al LCL, y en una nubosidad de estancamiento entre el LCL y el LFC (cumbre). Si la montaña posee una altura entre el LCL y el LFC la burbuja ascendente llegaría a la cumbre y generalmente descendería por la ladera de barlovento desapareciendo tal nubosidad casi fulminantemente. Este fenómeno es conocido como la capa de nubes que algunas montañas presentan cuando se da esta estructura vertical. Para terminar simplemente citamos que el LCL es más bajo que el CCL, lo que viene a significar que las bases nubosas en áreas montañosas son más bajas que las correspondientes en zonas mesetarias. Los topes nubosos presentan una distribución tal que son más altos los de las nubes mesetarias.

Todo el análisis anterior es independiente de la representación usada, ya que en definitiva, lo importante son los aspectos conceptuales que nos llevan a definir los niveles mencionados. Sin embargo, hemos citado anteriormente que un diagrama basado en la representación de energías estáticas, tendría ciertas ventajas de visualización que aquí vamos a analizar profundamente. A tal efecto, en la figura IV.6.2 presentamos un esquema genérico de energías estáticas frente a la presión. De acuerdo con las hipótesis de ascenso que hemos fijado anteriormente (cerrada y en equilibrio térmico con el aire circundante), el CCL vendría definido por un ascenso (S') desde el suelo siguiendo una paralela a la distribución vertical de S . Cuando tal evolución (S') corte a la curva $h^*(p)$ nos encontraremos en condiciones de saturación. A partir de ahí la burbuja asciende con la condición h^*_{CCL} -constante. Si por encima del CCL se cumple la

condición de que h^*_{CCL} es mayor que $h^*(p)$ la burbuja ascenderá saturada, con condensación progresiva hasta que tal condición deje de existir en el nivel de equilibrio (EL'). De esta forma el cúmulo se desarrolla tanto más vigorosamente cuanto que el pozo de potencial que aparezca a la izquierda de h^*_{CCL} -constante (en sentido ascendente) sea tanto mayor. Estos y otros aspectos han sido profusamente analizados en la bibliografía: García Díez et al (1987), García Díez et al (1988), Rivas y García Díez (1993) y Rivas et al (1994).

IV.6.2. Obtención del CCL en un diagrama S(P).

- Energía estática seca (S) para cada nivel p.
- Energía estática húmeda (h) para cada nivel p.
- Energía estática húmeda saturante (h^*) para cada nivel p.
- Ascenso según la hipótesis fijada: burbuja cerrada y en equilibrio térmico con el aire circundante. $S'=S+h_o$ (paralela a S) (Lq_o , es constante porque suponemos que la burbuja asciende cerrada, pero S no es constante porque no es un ascenso adiabático, la S que sigue el ascenso es la S real, por eso S' no es constante).

.....► Ascenso adiabático ya en saturación de la burbuja (h^*_{CCL} -constante). La burbuja asciende mientras h^*_{CCL} sea mayor que $h^*(p)$. (para que un ascenso adiabático acontezca, la burbuja que asciende adiabáticamente debe alcanzar en el estado inicial una energía conveniente asociada al CCL, esa energía es h^*_{CCL} , equivalente a la temperatura de disparo de los diagramas de Stüve).

La determinación del LCL en un ascenso forzado mediante una representación de energías estáticas es sin duda mucho más compleja porque, para su determinación, la nueva hipótesis de ascenso requiere que la burbuja ascienda de forma cerrada a la vez que adiabáticamente, y por ello, no ha sido abordado nunca en la bibliografía. Aquí vamos a presentar la forma correcta para su determinación en un diagrama de energías estáticas, dada la importancia que tiene en el problema del fuego. La figura IV.6.3. puede servirnos, en sentido genérico para la explicación oportuna de la obtención del LCL.

IV.6.3. Obtención del CCL, LCL y LFC en un diagrama S(P).

En esta figura IV.6.3. se encuentran representada tanto la obtención del CCL (estudiada de forma exclusiva en la figura IV.6.2.) como la del LCL y LFC.

Como novedades inmediatas en esta representación genérica respecto a la de la determinación del CCL son:

..... Representa la hipótesis de ascenso adiabático de una burbuja desde la superficie, a S_0 es constante.

..... Representa la h^* : Debido a que se supone un ascenso adiabático seco desde la superficie (S_0 constante regido por el gradiente adiabático) la humedad saturante h^* (dependiente de las temperaturas del entorno) ya no es la que va a determinar cuando se llegará a la saturación. $h^{*'}$ es la nueva humedad saturante que debe tenerse en cuenta si suponemos un ascenso adiabático de la burbuja desde la superficie. Y es:

$$h^{*'} = S_0 + Lq^*(T'), \quad (\text{IV.6.1})$$

siendo la $q^*(T')$ de cada nivel, la propia de la temperatura (T') que marca el gradiente adiabático, no la temperatura real a ese nivel marcada por el gradiente térmico vertical, que generaba $q^*(T)$.

.....→ Según la hipótesis de ascenso, la burbuja asciende de forma adiabática y a humedad constante (no intercambia vapor con el entorno). Es decir además de ser S_0 constante (por la hipótesis adiabática), Lq_0 es constante también (por la hipótesis de burbuja cerrada). Por lo tanto h_0 es constante. Pero h_0 no es constante porque la suma de S_0 y Lq_0 sea constante sino porque tanto S_0 como Lq_0 lo son. Esta línea representa precisamente esas dos condiciones del ascenso para una Lq_0 de superficie dada. Es equivalente a seguir la equisaturada y la adiabática seca en el diagrama de Stüve. Cuando esta humedad h_0 constante se iguale a la humedad saturante $h^{*'}$ propia del supuesto ascenso adiabático, se llegará a la saturación. A ese nivel se define el LCL.

---→ Ascenso adiabático forzado una vez llegada la saturación. Sigue manteniéndose la hipótesis de ascenso adiabático y burbuja cerrada sin flujo de masa con el exterior. S_0 , Lq_0 y h_0 constantes. Es el equivalente a seguir la adiabática saturada de los diagramas de Stüve.

---→ Ascenso adiabático no forzado una vez alcanzada la saturación (S_0 , Lq_0 y h_0 constantes). La burbuja asciende por sí misma mientras h_0 sea mayor que $h^*(p)$.

El LCL aparece como resultado de una evolución ascendente que sea simultáneamente adiabática y cerrada al flujo de materia. En consecuencia, a partir del nivel del suelo representamos las condiciones S_0 constante y h_0 constante. La primera representa la adiabaticidad, la segunda la adiabaticidad e impermeabilidad.

La evolución ascendente S_0 constante (adiabaticidad) irá definiendo temperaturas según el gradiente adiabático para cada z que nosotros fijemos, siendo posible por tanto, a partir de que fijemos una z , obtener una temperatura $T'(z)$, si S es constante ($S_0=S$) y conocido S_0 .

$$S_0 = C_p T_0 + g z_0 = C_p T' + g z = S \quad (\text{IV.6.2})$$

Así mismo, tendremos una $q^*(T')$, y por lo tanto una $h^{*'}(p) = S_0 + L q^*(T')$.

En definitiva, cuando nosotros fijamos una z , la condición S_0 constante nos “fabrica” una curva $h^{*'}(p)$. La interpretación de $h^{*'}(p)$ es la del potencial saturante de una atmósfera construida adiabáticamente sobre la burbuja del suelo. La intersección h_0 constante con $h^{*'}(p)$ nos define un estado denominado nivel de condensación forzado (LCL), lugar geométrico de las condiciones de ascenso adiabático, cerrado y saturante. Como es evidente también en este caso el LCL no pertenece a las gráficas de los potenciales principales por lo que sólo puede alcanzarse por un forzamiento orográfico. También es evidente verificar que el LCL (de zonas montañosas) está por debajo del CCL (de áreas mesetarias). Por ello, los cumulominbos formados por disparo son más enérgicos, más violentos.

Así mismo, continuando el ascenso con la hipótesis de adiabaticidad y cerramiento, alcanzado el LCL la burbuja no ascenderá, si no es forzadamente, a menos que se encuentre con la condición h_0 constante igual $h^*(p)$. Tal nivel donde se alcanza dicha condición se denomina nivel de libre convección (LFC), y la burbuja ascenderá saturada, con condensación progresiva mientras h_0 sea mayor que $h^*(p)$. El ascenso terminará en el denominado nivel de equilibrio (EL) que, lógicamente es más bajo que el nivel de equilibrio EL' .

La ventaja de esta representación en energías estáticas es que puede verse mejor que en ninguna otra que las burbujas del suelo, del LCL, del LFC y del EL tienen la misma energía (h_0). Ello nos llevaría a introducir una especie de principio de conservación de

la energía en una formación cumular: *La energía en cualquier punto del cúmulo es igual a la de la burbuja del suelo.*

Por otra parte nada hemos hablado del agua precipitable pero, ya podemos intuir, que guardará estrecha relación con el pozo de potencial $h_o > h^*(p)$.

En la figura IV.6.4 mostramos un ejemplo real del día 25/08/2000 en la estación de La Coruña de un diagrama $S(p)$ en el que se han hallado los diferentes niveles de la columna atmosférica, entre ellos el LCL y el LFC.

En todo caso la elevación de la burbuja del suelo pasa por una fase endoenergética, en un caso satisfecha por calentamiento y en otro por empuje cinético, seguida (no siempre) por una fase exoenergética. La formación cumular, y la consiguiente precipitación, exigen la existencia de dicha fase exoenergética. A este respecto es costumbre establecer un balance entre las exo y endoenergías, de tal suerte que si el balance es favorable a la exoenergía se interprete que el desarrollo cumular acontecerá. Naturalmente ello no es cierto, porque tal balance de energías es ficticio ya que se trata de un proceso secuencial en el que en primer lugar hay que satisfacer la endoenergía, y ello puede no tener lugar por mucha, poca, o nula exoenergía que pudiera computarse una vez alcanzado el CCL o el LFC. El que el proceso sea secuencial, es decir, deba requerirse la endoenergía, es la causa de que muchas zonas, como la costa mediterránea presenten de ordinario una exoenergía apreciable, pero es muy difícil que se satisfaga la endoenergía. Ello suele acontecer en zonas de alto contenido de vapor de agua en los bajos niveles, muy acrecentado éste a últimas horas de la tarde por la acción previa de transporte de la brisa de mar. Aún siendo lugares de alto nivel de temperaturas, el disparo no se alcanza casi nunca.

En cualquier caso existen en la bibliografía determinadas magnitudes energéticas asociadas a las fases endo y exoenergéticas. Últimamente en algunos trabajos son consideradas en relación a nuestro problema del fuego: Potter (2001), Potter y Martin (2001), Potter et al (2003) y Jenkins (2002), (2004), por lo que vamos a describirlas de forma escueta. Más adelante en el capítulo X nos referiremos a ellas en términos operativos sobre casos reales.

Figura IV.6.4. Ejemplo de una situación y descripción de los niveles en un Diagrama S(p).

A) Convective Available Potencial Energy (CAPE) o energía potencial disponible para la convección.

La energía potencial disponible para la convección se define como:

$$CAPE = 9.8 \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta Z_i (T_{Pi} - T_{Ei}) / T_{Ei}) \quad \text{J/kg} \quad (\text{IV.6.3.})$$

i=1=nivel LFC

n=nivel EL

Siempre que $T_P > T_E$

dónde

ΔZ_i es el espesor del estrato i.

T_{Pi} es la temperatura del ascenso adiabático del estrato i.

T_{Ei} es la temperatura del entorno (en la curva de estado) del estrato i.

Y viene a representar, en dimensiones de energía, el área que existe entre la evolución adiabática saturada y la curva de estado desde la base activa LFC hasta el tope de la nube. Algunos autores la denominan inestabilidad latente positiva.

En nuestro diagrama de potenciales la CAPE vendría definida por:

$$CAPE = g \sum_{i=1}^n \Delta Z_i \left(\frac{h_o - h_i^*}{h_i^*} \right) \quad \text{J/kg} \quad (\text{IV.6.4.})$$

n=EL

1=LFC

siempre que $h_o > h_i^*$

Esta expresión de la CAPE en forma discreta puede expresarse de forma continua de la forma:

$$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \left(\frac{h_o - h_i^*}{h_i^*} \right) dz \quad \text{J/kg} \quad (\text{IV.6.5.})$$

En términos operativos, los grandes cumulonimbos presentan valores muy altos de CAPE con precipitación intracumular masiva precedida de generalizados procesos de condensación; alcanzado el tope de la nube, el movimiento ascendente se torna en movimiento divergente horizontal y, en sentido lateral el cumulonimbo va cediendo calor al entorno al ir disminuyendo la velocidad ascensional, rompiéndose la hipótesis adiabática en los niveles por debajo del tope. En otras palabras, la corriente ascendente disminuye su velocidad mediado el cumulonimbo, y esta pérdida de velocidad hace que el tal movimiento ascendente empiece a presentar un comportamiento diatermo (no adiabático). De hecho, muchos autores (Arakawa y Schubert , 1974) apuntan la idea de la no constancia de la evolución adiabática una vez superado el punto medio del cumulonimbo (procesos de *entrainment*). En definitiva, este es el resultado de la formación cumulonímica: transportar calor desde el suelo hasta los altos niveles.

B) Convection Inhibition (CIN) o Inhibición Convectiva

La inhibición convectiva viene a significar la endoenergía desde el suelo hasta el LFC, y viene expresada por :

$$CIN = 9.8 \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta Z_i (T_{Pi} - T_{Ei}) / T_{Ei}) \quad \text{J/kg} \quad (\text{IV.6.6.})$$

n=LFC

1=suelo

Siempre que $T_P < T_E$

dónde

ΔZ_i es el espesor del estrato i.

T_{Pi} es la temperatura del ascenso adiabático del estrato i.

T_{Ei} es la temperatura del entorno (en la curva de estado) del estrato i.

En nuestro diagrama la expresión sería:

$$CIN = g \sum_{i=1}^n \Delta Z_i \left(\frac{h_o - h_i^*}{h_i^*} \right) \quad \text{J/kg} \quad (\text{IV.6.7.})$$

$$n=LFC$$

$$l=suelo(1000 \text{ hPa})$$

$$\text{siempre que } h_o < h_i^*$$

La expresión de forma continua sería:

$$CIN = g \int_{SUELO}^{LFC} \left(\frac{h_o - h_i^*}{h_i^*} \right) dz \text{ J/kg} \quad (\text{IV.6.8.})$$

Según esta expresión los valores de la CIN serán siempre negativos, tanto más negativos cuanto más inhibición convectiva, de ahí que algunos autores denominen a este parámetro como CAPE negativa. Cuanto más negativa sea la CIN (mayor en valor absoluto) mayor es la dificultad de la convección.

C) Balance CIN y CAPE

El balance “aparente” exoenergético (BE) vendría dado por:

$$BE = CAPE - |CIN|, \quad (\text{IV.6.9.})$$

CIN en valor absoluto por venir dada en valores negativos, y donde la apariencia de tal balance radica en la no disponibilidad real simultánea de ambas contribuciones energéticas. La exoenergía CAPE no puede ser invertida en cancelar la energía CIN. Como hemos citado en la costa mediterránea los valores de CAPE son extraordinariamente altos, pero aún siendo mucho menor la energía CIN en valor absoluto, ésta no se satisface salvo en muy contadas ocasiones. A pesar de todo lo dicho a cerca de la secuencialidad en la existencia de CIN y CAPE, algunos autores lo consideran como un índice de actividad cumular.

D) Agua precipitable y agua precipitada

El proceso de condensación que tiene lugar en el cumulonimbo a partir del CCL o LCL va a conllevar la aparición de agua líquida que, por efecto gravitatorio descenderá. Dicho descenso será rápido, con lo cual la posibilidad de evaporación debe ser contemplada. Además, el estado de humedad (contenido de vapor) del estrato suelo-

nivel de condensación puede, sin duda, favorecer la evaporación de dicha gota líquida. Si la gota cae muy rápidamente aumentará la posibilidad de evaporación por el carácter dinámico, pero en sentido contrario mantendrá firme la hipótesis de adiabaticidad. La situación contraria (que caiga despacio), con resultado opuesto también debe ser contemplada. El resultado es, desde luego, que el agua precipitada en el suelo es menor que el agua que abandona la base nubosa.

En la bibliografía se suele considerar como efecto más fuerte el efecto evaporante del estrato suelo-base cumular, y a tal efecto, se suele definir el Poder Evaporante de la Atmósfera (PEA) en forma proporcional al déficit de saturación que exista en dicho estrato.

En nuestro diagrama la expresión oportuna sería:

$$PEA = g \sum_{i=1}^n \Delta Z_i \left(\frac{h_i^* - h_i}{h_i} \right) = g \sum_{i=1}^n \Delta Z_i \left(\frac{D_i}{h_i} \right) \text{ J/kg} \quad (\text{IV.6.10.})$$

1=suelo (1000 hPa)

n=LFC

En forma continua la expresión sería:

$$PEA = g \int_{SUELO}^{LFC} \left(\frac{h_i^* - h_i}{h_i} \right) dz = g \int_{SUELO}^{LFC} \left(\frac{D_i}{h_i} \right) dz \text{ J/kg} \quad (\text{IV.6.11.})$$

Todos los conceptos explicados anteriormente no resultan lejanos en absoluto a nuestro problema del fuego y en ello abundaremos más adelante. La convección húmeda, con resultado de formación cumular, empieza siendo un proceso de convección seca (por debajo del nivel de condensación) y eso va a afectar las condiciones de fuego. Posteriormente la propia formación cumular con resultado de agua líquida tendería a debilitar las condiciones de fuego, especialmente si el agua precipitada en el suelo es mayoritariamente la que abandona la nube. Pero ello puede no ser así ya que en condiciones de alto Poder Evaporante en el estrato suelo-base cumular, la precipitación recogida en el suelo puede ser despreciable, incluso nula. El que se dé una u otra posibilidad altera fuertemente las condiciones de fuego.

En definitiva la convección en ambiente húmedo representa la circunstancia más dificultosa en relación al fuego, ya que, el que dicha convección se resuelva de una u otra forma en el sentido explicado anteriormente puede cambiar totalmente el riesgo de fuego, de tal forma que un día puede presentar actividades de fuego muy distintas. Con el consiguiente estado de dudas para el operativo antifuego.

Un aspecto dinámico a considerar en zonas costeras es el efecto de la brisas. Estas zonas suelen presentar alta actividad de fuego, que ya hemos citado en sentido de contraste entre las condiciones climatológicas y las condiciones meteorológicas. Pero aquí el problema de las brisas viene a ser considerado en términos de cómo la virazón puede perturbar, y perturba de hecho, los más bajos niveles de un diagrama aerológico, siendo éste un problema complejo. Como se sabe las brisas son movimientos cerrados de aire que obedecen al *Teorema de Bjerknes* y que hallan su causa en desajustes en los gradientes de presión y temperatura, tal desajuste direccional de gradientes es debido a la diferente respuesta térmica que da el aire superior de la tierra (costa) con respecto al aire superior de la superficie del mar. De esta manera la virazón sopla de mar a tierra unas horas después del mediodía, con el efecto de transporte de aire más frío desde el mar hacia tierra. Ello trae como consecuencia que la curva $S(p)$ tienda a desplazarse hacia la izquierda (por enfriamiento). En cuanto a la base de la curva $h(p)$, esta presentaría dos tendencias: a disminuir por el enfriamiento y a aumentar por la humidificación. Si predomina la primera el resultado será una disminución de h_0 con lo que la CAPE disminuirá porque disminuye el minuendo (h_0) del numerador de su expresión manteniéndose constante el sustraendo (h^*) ya que en los niveles donde está definida la CAPE no se detecta alteración térmica por efecto de la brisa. En cuanto a la CIN, ésta se va a resentir con resultado de dificultad de la convección. Lo engorroso del anterior razonamiento queda absolutamente claro si se medita el hecho de que un enfriamiento fuerte solapado con una humidificación débil tiene como resultado la estabilización de la columna. La otra posibilidad, esto es, que predominara la humidificación llevaría a un aumento de h_0 con lo que la CAPE aumenta sin discusión. En cuanto a la CIN resulta que la dificultad de la convección se va a reducir. Ello se corresponde con el hecho de que una humidificación predominante en los bajos niveles tiende a favorecer el desarrollo convectivo.

Para terminar, simplemente señalar que existen discrepancias para el cálculo de estos parámetros energéticos (CAPE, CIN, PEA) relativas a los niveles a partir de los cuales se calculan. En cuanto a la CAPE lo usual es considerar como nivel inferior el LFC pero con similar sentido físico podría ser considerada sobre el nivel inicial CCL. En cuanto a la CIN, algunos autores precisan que el nivel inferior de definición debería ser el nivel superior de la capa de mezcla sobre el suelo, para otros se considera directamente el suelo. Similares razonamientos se pueden realizar para la determinación del PEA.

CAPÍTULO V:

BASES DE DATOS CONSIDERADAS

Uno de los objetivos de este trabajo es dejar bien reflejado todo el procedimiento para poder realizar futuras validaciones y optimizaciones del modelo GD similares a la aquí presentada. Es razonable, por tanto, que este capítulo de las bases de datos consultadas preceda al que analiza los índices de riesgo de fuego.

V.1. Datos meteorológicos

Las bases de datos meteorológicas son la herramienta básica de cualquier investigador de la atmósfera. Gracias a que existe una amplia red de observatorios y de estaciones de radiosondeo de la Organización Meteorológica Mundial, se dispone de una gran cantidad de información en continuo de prácticamente todos los lugares del planeta. Del total de la información meteorológica, a nosotros nos resultará de un mayor interés la referida a la Península Ibérica, haciendo más hincapié a la región de Galicia (España).

Algunos datos que pueden ser útiles en la optimización y análisis comparativos del modelo GD, a parte de los propios de radiosondeos, son los datos de precipitación, de valores de diferentes índices meteorológicos, de niveles de condensación de la columna, etc. Todos ellos son fácilmente extraíbles de diferentes bases de datos meteorológicas existentes.

Para el estudio del modelo GD son necesarios datos de radiosondeo meteorológico, pero también son necesarios datos sobre el número de incendios diarios en las diferentes provincias donde quiera ser estudiado, cuyas bases serán comentadas en otro apartado.

V.1.1. Radiosondeos convencionales.

Para la obtención de los datos atmosféricos de temperatura, humedad, presión y altitud, fundamentales para nuestros estudios, no son suficientes los instrumentos convencionales utilizados en la observación de la parte baja de la atmósfera próxima a la superficie, tales como: termómetros de máxima y mínima, psicrómetros, anemómetros y barómetros. Necesitamos información del aire que existe en la columna atmosférica que se encuentra encima de nosotros y para registrarlos son necesarios métodos más complejos. El método experimental por el cual son recogidos las propiedades físicas de los diferentes niveles de presión (altitudes) de la atmósfera de un

lugar son los globos sonda o también llamados radiosondeos. Éstos ascienden con instrumental adecuado capaz de enviar a un receptor en superficie información relativa a la presión, velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad mediante transmisión por radio. Estos radiosondeos pueden ser efectivos hasta los 30.000 metros de altura aunque en nuestro caso los datos que nos interesan no van más allá de los 10.000 metros, límite de la troposfera, estrato de la estructura vertical de la atmósfera en el cual acontecen los fenómenos meteorológicos.

Los radiosondeos son llevados a cabo de forma regular en una extensa red de estaciones a lo largo de todo el mundo. Inicialmente los datos eran obtenidos cada 12 horas pero en la actualidad las estaciones ofrecen información cada 6 horas según el horario local Z. Su tarea básica es obtener una visión global del estado de la atmósfera, objetivo conseguido con bastante destreza. No obstante nunca se alcanza el grado ideal de realidad que se pudiera desear ya que estos procedimientos conllevan en sí mismos una serie de errores. Los diseñadores y operadores de radiosondas tratan de aproximarse lo más posible a la situación real, y para ello hacen uso de una serie de técnicas cuyos procedimientos están desarrollados por la Organización Meteorológica Mundial (Hooper 1975).

La Organización Meteorológica Mundial (OMM.) establece una serie de normas para la observación de datos meteorológicos de radiosondeo en una red de estaciones existentes a nivel mundial. En la Península Ibérica y en los dos archipiélagos españoles existen una serie de estaciones de radiosonda pertenecientes a esa red de la OMM en las siguientes localizaciones: La Coruña(43.37 N- 8.42 O), Santander(43.47 N- 3.82 O), Zaragoza (41.67 N- 01.02 O), Palma de Mallorca(39.55 N- 2.62 E), Murcia(38.00 N- 1.17 O), Gibraltar (36.15 N- 5.33 O), Santa Cruz de Tenerife(28.47 N- 16.25 O), Lisboa(38.77 N- 9,13 O) y Madrid (Barajas) (40.47 N- 3.58 O).

Según va ascendiendo la sonda nos va informando sobre una serie de niveles atmosféricos. Existen unos niveles isobáricos tipo sobre los cuales es obligatorio informar en toda observación. Esos niveles son: superficie, 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150 y 100 hPa. Otros niveles también medidos son los puntos notables característicos de ese lugar.

Una vez tomada dicha información en cualquier estación de la OMM, es rápidamente divulgada para su procesamiento y análisis. Estos datos son de mucha utilidad en la predicción meteorológica y en el estudio científico de la atmósfera, puesto que son los *input* de numerosos modelos de predicción e índices meteorológicos, así como la base de datos fundamental en proyectos de investigación de la física atmosférica. Este tipo de datos tiene un uso muy extendido entre la comunidad científica encargada de estudiar la física atmosférica, siendo asumida, por lo tanto, su elevada capacidad de representatividad de la atmósfera real.

Los datos de radiosondeo los encontramos disponibles en bases de datos de diferentes organismos meteorológicos. Valgan como ejemplos las fuentes utilizadas por nosotros para la obtención de los datos. El INM (ahora Agencia Estatal de Meteorología) proporciona los datos de las diferentes estaciones españolas en forma de archivos TEMP. El NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) en Internet a partir del año 1998, proporciona dichos datos para todas las estaciones de la OMM a nivel mundial en forma de archivos RAOB. La Universidad de Wyoming vía web proporciona archivos con información sobre los diferentes niveles de la atmósfera en las estaciones de la OMM.

Una cuestión a tener en cuenta son las limitaciones existentes en el uso de radiosondeos como evaluación del estado de la atmósfera. Los radiosondeos aportan información en cada uno de los niveles de la columna sobre las propiedades de la atmósfera como son la temperatura, la presión y la humedad, y la situación ideal sería que la información que envían fuera exacta, pero en la realidad los datos contienen una serie de errores de diversa índole. Estos errores varían de una sonda a otra incluso para las hechas bajo las mismas especificaciones. Además dado que para cada vuelo se utiliza una sonda diferente, ya que son de un solo uso, los errores en un sondeo son independientes de cualquier otro que se realice. Bajo estas circunstancias lo mejor que se puede hacer por parte de los analistas es asumir los resultados, confiar en que la población de radiosondeos ordinarios tomado en la red mundial es correcta y que la variabilidad entre una sonda y otra es aceptablemente pequeña.

Para reducir esos errores sería necesario que los operadores de radiosondeos pudieran estimar con una alta frecuencia la idoneidad de las sondas utilizadas, y para ello lo ideal

sería hacer una serie de vuelos cuando las propiedades de la atmósfera fueran conocidas con exactitud por otra fuente independiente. De esta forma los equipos podrían ir mejorándose en su precisión. Pero todavía no se conoce ninguna técnica posible que nos ayude a determinar la confianza de un radiosondeo. Las técnicas de satélite que se están comenzando a utilizar de medidas de radiancia podrían servir como referencia o incluso como información veraz en sí misma, pero tampoco representan la atmósfera en su estado real.

Por nuestra parte no nos queda más remedio que asumir con la confianza necesaria los datos aportados por los sondeos rutinarios de la red de estaciones. Los sondeos rutinarios tienen a su favor que todos son tomados simultáneamente en las diferentes localizaciones, y sus resultados pueden ser comparados teniendo en cuenta la diferenciación espacial. No se consigue así que los resultados sean más veraces pero el error es muy similar en todos los lugares. Por lo tanto, las diferencias observadas entre radiosondeos se aproximan a las diferencias que puedan existir en la realidad. Es decir los datos de los radiosondeos rutinarios poseen la propiedad de la uniformidad.

Como hemos comentado, en estos radiosondeos rutinarios existe un error que podría extraerse de la comparación de toda la población de radiosondas recogidas. Podrían encontrarse así diferencias individuales con respecto a la media y desviación estándar, que constituirían el error sistemático y de sonda respectivamente. Estos errores no pueden ser solventados y deben ser asumidos por el analista de los datos. Pero en ocasiones se encuentran valores que inevitablemente deben ser descartados cuando no son efectos conocidos en la atmósfera real y los radiosondeos en general. Son errores acaecidos posiblemente durante la observación o en el proceso de cálculo. Coincidiendo con otros autores consideramos que no existe mejor fuente para detectar esos efectos no reales que la mente humana, para lo cual se necesita una experiencia y una destreza que no puede ser superada por ningún ordenador, por la capacidad del ser humano de descartar ideas preconcebidas. Los valores obtenidos en un radiosondeos deben ser tomados siempre con cierta relatividad y ser analizados adecuadamente por una persona capacitada.

En una red de datos de radiosondeo existe la alternativa de utilizar programas informáticos en la detección de posibles errores existentes, pero son métodos menos

precisos. A nuestro juicio, la opción más adecuada es el análisis humano. Este proceso requiere el análisis del total de sondeo, la evaluación de su idoneidad para aceptarlo o descartarlo, y de tener que descartarlo, saber qué nueva serie de valores tomar como representativos, como por ejemplo, de esa misma estación a otra hora o de otra estación cercana a esa misma hora. También el proceso requiere un análisis de la idoneidad de cada valor individual para aceptarlo o descartarlo, y de descartarlo saber qué valor es el representativo. Estas labores han sido llevadas a cabo exhaustivamente a lo largo de la elaboración de este trabajo de tesis para cada uno de los datos de radiosondeo tomados de las bases de datos e introducidos en los diferentes estudios.

En todo este análisis podría ayudarnos la representación gráfica del radiosondeo. Algunas representaciones aerológicas de este tipo, comentadas en el apartado IV.5, suelen estar disponibles en bases de datos actualizadas a diario, o pueden representarse sin mucho esfuerzo para los diferentes niveles geopotenciales.

Con un conocimiento previo y adecuado de los procesos reales que pueden acontecer en la atmósfera pueden descartarse series de datos que a criterio del analista se consideren imposibles o improbables desde un punto de vista meteorológico. Por ejemplo lo lógico es que no existan fuertes inversiones de temperatura en estratos intermedios de la troposfera, o situaciones de inestabilidad absoluta. Sólo son dos ejemplos de posibles situaciones a descartar.

Hooper (1975) presenta métodos de análisis humano para detectar errores de radiosondeos en el seno de una red espacial de estaciones. Estos métodos pasarían por la representación de mapas de una superficie geopotencial junto con el valor puntual de geopotencial de todas las estaciones a ese nivel.

Los datos de radiosondeos están disponibles mediante unos archivos que mostraremos a continuación:

Los **archivos TEMP** proporcionados por el INM se presentan de forma codificada. Estos archivos están divididos en cuatro apartados: TTAA, TTBB, TTCC y TTDD. Nosotros utilizaremos los datos del apartado TTAA y en algunas ocasiones los datos del TTBB. En el TTAA se encuentra la información referida a los niveles isobáricos tipo en

superficie, 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150 y 100 hPa. En cambio en el TTBB se encuentra la información sobre puntos notables.

Los datos se refieren a los siguientes parámetros:

- Altura de la superficie isobárica en metros geopotenciales (que son prácticamente equivalentes a los metros lineales, porque se supone que la constante de gravedad g no varía con la altura).
- Temperatura en °C.
- Decremento de rocío, esto es, la diferencia entre la temperatura efectiva y la temperatura de rocío.
- Dirección e intensidad del viento (en ° y kt).

Esta información está codificada en base a una sistematización con el fin de aportar una mayor cantidad de información de manera efectiva en el menor espacio posible. Es preciso hacer una descripción de dicha sistematización y conocer el modo de extracción de la información de este tipo de archivos. Para ello presentamos un ejemplo para el día 7 de Septiembre de 2000 a las 00:00 h en la estación de radiosondeo de La Coruña:

DIA 07 DEL MES 09 A LAS 00; AÑO 00.

ZCZC

USSP40 LECR 070000

TTAA 56221 08001

99014 19213 27002 00182 17608 27505 92845 13402 01008

85562 14857 30510 70188 09081 32012 50589 07758 31011

40759 19956 35516 30966 35956 02517 25090 46358 06514

20234 58750 04531 15410 64564 04527 10657 64772 32514

88167 67356 04029

77999

31313 47106 82227=

NNNN

ZCZC

UKSP40 LECR 070000

TTBB 56226 08001

00014 19213 11925 13202 22915 15258 33909 14414 44872

13625 55862 15258 66833 14663 77829 14257 88802 14267

99746 11078 11717 09463 22700 09081 33675 07268 44664

07278 55644 05478 66631 04675 77617 03058 88539 04557

99463 11159 11387 21950 22352 26357 33291 37950 44280

40158 55268 42364 66239 48760 77231 50750 88203 58356

99167 67356 11162 62757 22142 63367 33127 68967 44121

65168 55100 64772

21212 00014 27002 11919 01010 22870 34510 33857 30510

44852 31510 55849 30010 66845 31510 77841 30010 88835

30510 99815 30010 11774 32509 22733 29510 33720 28513

44708 31013 55704 30012 66699 32012 77691 31012 88666

34014 99643 34020 11573 35517 22526 34014 33503 31011

44465 32014 55434 31012 66420 34516 77400 35516 88348

35009 99347 35009 11327 02512 22294 02517 33272 05515

44239 07015 55209 04534 66173 05530 77163 03532 88146

04528 99128 06006 11123 05509 22114 34515 33107 02524

44100 32514

31313 47106 82227

41414 26200

51515 11901 01013 22800 32009 33600 34517=

NNNN

ZCZC

ULSP40 LECR 070000

TTCC 56223 08001

70874 65379 32013 50082 59581 35513 30406 54183 15508

20672 /////

88999
 77999
 31313 47106 82227=
 NNNN
 ZCZC
 UESP40 LECR 070000
 TTDD 5622/ 08001
 11845 67975 22407 55182 33374 56982 44245 49984
 21212 11989 31012 22969 32514 33967 31012 44949 35017
 55921 35517 66888 29519 77808 34522 88764 34511 99762
 35511 11743 33510 22718 31510 33718 30010 44674 00517
 55660 35018 66650 36023 77608 01509 88602 00507 99558
 34512 11548 00517 22534 01020 33527 34007 44519 33007
 55488 35519 66480 01012 77451 36005 88424 03508 99404
 11012 11397 18008 22348 09011 33341 07514 44317 08013
 55314 09512 66310 14010 77253 15010
 31313 47106 82227=
 NNNN

En este ejemplo de archivo TEMP del día 7 de septiembre de 2000 podemos ver los cuatro apartados de los que hablábamos con anterioridad. Pero vamos a centrarnos en el apartado TTAA de los niveles tipo:

TTAA 56221 08001
99014 19213 27002 | **00182** 17608 27505 | **92845** 13402 01008
85562 14857 30510 | **70188** 09081 32012 | **50589** 07758 31011
40759 19956 35516 | **30966** 35956 02517 | **25090** 46358 06514
20234 58750 04531 | **15410** 64564 04527 | **10657** 64772 32514

En la primera fila básicamente se indica el título del apartado (TTAA) y la identificación de la estación de radiosondeo (08001). Es el código de identificación de la estación en la red de la OMM. Las dos primeras cifras (08) indican la zona geográfica

en la que nos encontramos, siendo en este caso la propia de la Península Ibérica, Azores y Madeira. Las tres últimas cifras (001) identifican a la estación siendo la de La Coruña en este caso.

Posteriormente nos encontramos con las filas de datos correspondientes a cada uno de los niveles isobáricos tipo. Cada nivel viene representado por tres grupos de números de cinco cifras cada grupo. Es decir cada nivel posee quince cifras. Dentro de cada nivel, las dos primeras cifras (que he marcado con negrita), nos señalan el nivel en el que nos encontramos. Si las dos primeras cifras son 99 significa que nos encontramos en el nivel de superficie. 00 es 1000 hPa, 92 es 925 hPa, 85 es 850 hPa, 70 es 700 hPa, 50 es 500 hPa, 40 es 400 hPa, 30 es 300 hPa, 25 es 250 hPa, 20 es 200 hPa, 15 es 150 hPa, 10 es 100 hPa. El resto de dígitos dentro de cada nivel (los trece restantes) nos dan la información meteorológica de ese nivel.

Tomemos como ejemplo el nivel de 850 hPa :

85562 14857 30510

- 85562: El 85 indica que nos encontramos al nivel de 850 hPa y el 562 nos indica que la altura correspondiente a ese nivel de presión es 1562 m. La cifra de los millares se omite en la sistematización de los archivos TEMP porque se sabe que esta superficie isobárica oscila entorno a los 1500 m según la atmósfera estándar.
- 14857: El 148 nos dice la temperatura del entorno en décimas de grado, con lo cual la temperatura a ese nivel de presión es 14,8 °C. Aquí hay que tener en cuenta que si la cifra decimal es par, la temperatura es positiva mientras que si es impar, es negativa. El 57 indica el decremento de rocío, también expresado en décimas de grado. Cuando el decremento de rocío es superior a 55, como es el caso, se resta 50 de su valor. Luego en este caso es 7 °C. La temperatura de rocío será entonces 7,8 °C.
- 30510: 305 indica la dirección del viento, en este caso 305°, es decir del Noroeste. Las dos cifras finales indican la velocidad del viento, tratándose en este caso de 10 kt.

Hemos visto el ejemplo de un nivel pero esta interpretación es la misma para el resto de niveles isobáricos tipo de los archivos TEMP.

En el caso de los puntos notables existen variaciones en la interpretación con respecto a lo visto para los niveles tipo. En los archivos TEMP, en el apartado TTBB de los puntos notables también se proporciona información sobre la presión, la temperatura del entorno y del decremento de rocío, pero la sistematización en la presentación de los datos es diferente.

TTBB 56226 08001

00014 19213 **11925** 13202 **22915** 15258 **33909** 14414 **44872**
13625 **55862** 15258 **66833** 14663 **77829** 14257 **88802** 14267
99746 11078 **11717** 09463 **22700** 09081 **33675** 07268 **44664**
07278 **55644** 05478 **66631** 04675 **77617** 03058 **88539** 04557
99463 11159 **11387** 21950 **22352** 26357 **33291** 37950 **44280**
40158 **55268** 42364 **66239** 48760 **77231** 50750 **88203** 58356
99167 67356 **11162** 62757 **22142** 63367 **33127** 68967 **44121**
65168 **55100** 64772

21212 **00014** 27002 **11919** 01010 **22870** 34510 **33857** 30510
44852 31510 **55849** 30010 **66845** 31510 **77841** 30010 **88835**
30510 **99815** 30010 **11774** 32509 **22733** 29510 **33720** 28513
44708 31013 **55704** 30012 **66699** 32012 **77691** 31012 **88666**
34014 **99643** 34020 **11573** 35517 **22526** 34014 **33503** 31011
44465 32014 **55434** 31012 **66420** 34516 **77400** 35516 **88348**
35009 **99347** 35009 **11327** 02512 **22294** 02517 **33272** 05515
44239 07015 **55209** 04534 **66173** 05530 **77163** 03532 **88146**
04528 **99128** 06006 **11123** 05509 **22114** 34515 **33107** 02524
44100 32514

Primeramente se muestran los datos de presión y temperatura y en la parte final del apartado existe otro bloque en el que se informa de los datos de viento.

En el primer bloque cada punto notable viene expresado por diez dígitos, dividido en dos grupos de cinco números cada uno. Los dos primeros números de cada punto notable (en negrita) indican el orden tomando siempre como valor inicial el más cercano

a la superficie. Siempre se comienza con las cifras **00**, representando a ese punto notable más cercano a la superficie. El resto de los puntos notables vienen indicados con las cifras 11,22,33,44,55 y así sucesivamente. Si existen más de 10 puntos notables los siguientes se indican volviendo a iniciar una numeración desde 11.

Las siguientes tres cifras de cada punto notable indican la presión de ese nivel en hPa. Ya en el segundo grupo de cinco cifras del punto notable se indican la temperatura y el decremento de rocío en décimas de grado de forma análoga a como se esperaza en los niveles isobáricos tipo.

Pongamos un ejemplo de un punto notable en concreto para el día 7 de septiembre de 2000:

22915 15258

- 22: Indica el orden del punto notable en el que nos encontramos, en este caso es el tercero empezando desde la superficie. Podría ser el punto notable decimosegundo también puesto que de existir más de 10 la numeración comenzaría de nuevo.
- 915: La presión de ese nivel en hPa. En este caso 915 hPa.
- 15258: Donde 152 indica la temperatura en décimas de grado. Es decir 15.2 °C. Y 58 el decremento de rocío que al ser mayor que 55 se deben de restar 50, luego el decremento es 8° C. La Temperatura de rocío resulta 7.2° C.

En el segundo bloque los puntos notables vienen ordenados del mismo modo que hemos visto con anterioridad, partiendo desde el nivel más cercano en la superficie hasta el más alejado. Cada punto notable viene expresado con 10 dígitos. Los dos primeros se refieren al orden. Los tres siguientes a la presión de ese nivel, y los cinco restantes, tres indican la dirección del viento y los dos últimos la velocidad del viento en kt. Siguiendo el ejemplo:

66845 31510

- 66: indica el orden, es el séptimo punto notable.
- 845: es la presión de ese punto notable. 845 hPa.

- 315: Dirección del viento. Cuadrante Noroeste.
- 10: velocidad del viento, 10 kt.

Los datos del radiosondeo también se proporcionan en **archivos RAOB** de acceso libre en la página web del **NOAA** y que están disponibles desde el año 1998. Estos archivos se presentan en formato FSL. El formato oficial FSL es similar al formato utilizado por el NSSFC (National Severe Storms Forecast Center) en Kansas City.

Pongamos el mismo ejemplo de un archivo RAOB para el día 7 de septiembre de 2000 en La Coruña:

254	23	6	SEP	2000		
1	99999	8001	43.37N	8.42W	67	2227
2	1000	1270	8500	44	7	3
3		9999			99999	kt
9	10140	67	192	179	270	2
4	10000	182	176	168	275	5
4	9250	845	134	132	10	8
5	9150	936	152	72	99999	99999
5	9090	991	144	130	99999	99999
5	8720	1339	136	111	99999	99999
5	8620	1436	152	72	99999	99999
4	8500	1562	148	78	305	10
5	8330	1732	146	16	99999	99999
5	8290	1772	142	72	99999	99999
5	8020	2050	142	-28	99999	99999
5	7460	2654	110	-170	99999	99999
5	7170	2982	94	-36	99999	99999
4	7000	3188	90	-220	320	12
5	6750	3487	72	-108	99999	99999
5	6640	3622	72	-208	99999	99999
5	6440	3872	54	-226	99999	99999
5	6310	4038	46	-204	99999	99999
5	6170	4219	30	-50	99999	99999
5	5390	5294	-45	-115	99999	99999

4	5000	5890	-77	-157	310	11
5	4630	6482	-111	-201	99999	99999
4	4000	7590	-199	-259	355	16
5	3870	7833	-219	-269	99999	99999
5	3520	8522	-263	-333	99999	99999
4	3000	9660	-359	-419	25	17
5	2910	9870	-379	-429	99999	99999
5	2800	10133	-401	-481	99999	99999
5	2680	10430	-423	-563	99999	99999
4	2500	10900	-463	-543	65	14
5	2390	11197	-487	-587	99999	99999
5	2310	11419	-507	-557	99999	99999
5	2030	12244	-583	-643	99999	99999
4	2000	12340	-587	-637	45	31
5	1620	13647	-627	-697	99999	99999
4	1500	14100	-645	-785	45	27
5	1420	14435	-633	-803	99999	99999
5	1270	15110	-689	-859	99999	99999
5	1210	15401	-651	-831	99999	99999
4	1000	16570	-647	-867	325	14

La interpretación de estos archivos es mucho más sencilla que la vista en los TEMP. Podríamos ordenar el archivo por filas y por columnas. Existen un número indeterminado de filas dependiendo del número de niveles sondeado. Cada día tendrá un número de filas en su archivo RAOB. Pero el número de columnas sí es fijo en estos archivos, y es siempre de 7 columnas.

Las cuatro primeras filas del archivo son líneas que aportan datos sobre el sondeo. El resto de las filas son líneas de datos. Cuando en una columna aparece una entrada 99999, esto indica que falta la información, bien sea porque se perdió, no se registró o no es aplicable. Veamos las cuatro primeras filas una a una:

254 23 6 SEP 2000

La primera fila viene siempre encabezada en la primera columna por un 254 que indica que un nuevo sondeo comienza en el archivo. La segunda columna nos muestra la hora

del sondeo. Hemos comprobado que la hora aquí mostrada lleva un retraso de 1 hora con respecto al horario utilizado por nosotros. De tal manera que si necesitamos datos de las 00:00 h del lugar en estos archivos RAOB se deben de tomar los datos de las 23:00 h del día anterior. La tercera y cuarta columna de esta primera fila muestra el día y el mes respectivamente. La quinta fila el año.

1 99999 8001 43.37N 8.42W 67 2227

La segunda fila viene encabezada en la primera columna con un 1, indicativo de que estamos en la fila de identificación de la estación de radiosondeo. Entre los datos de identificación de la estación destacaríamos en la tercera columna el código de la OMM de la estación de radiosondeo. En este caso es 08001, que es el código de identificación de la estación de La Coruña. Otros datos a reseñar son la latitud, longitud y altitud sobre el nivel de mar de la estación, situadas en la cuarta, quinta y sexta columna respectivamente.

2 1000 1270 8500 44 7 3

La tercera fila comienza con un 2 en la primera columna, significando que es un línea de chequeo del radiosondeo. La segunda columna (1000) indica la presión del nivel en el cual la sonda pasa el chequeo hidrostático. La tercera columna (1270) indica la presión del nivel que tiene el viento máximo del sondeo. Si en el cuerpo del sondeo no hay ningún nivel “8” entonces este valor es estimado. La cuarta columna (8500) indica el nivel z que contiene la tropopausa. Al igual que en caso anterior, si en el cuerpo del sondeo no hay ningún nivel “7”, este dato es una estimación. La quinta columna (44) indica el número de niveles del sondeo, incluyendo las cuatro líneas de identificación, que son las que ahora estamos explicando. La sexta columna es un indicador para la tropopausa estimada, si nos encontramos con un “7” significa que suficientes datos estuvieron disponibles para realizar la estimación, un “11” indica que los datos se terminaron y que la tropopausa es una tropopausa supuesta. La columna 7 indica la fuente de los datos, si es “0” es el National Climatic Data Center, “1” el Atmospheric Environment Service de Canada, “2” el National Severe Storms Forecast Center, “3” son datos sólo de GTS o FSL GTS y “4” de la fusión de datos del NCDC y datos GTS.

3 9999 99999 kt

La cuarta fila comienza con un 3 en la primera columna e indica que esta fila contiene datos de identificación de la estación y otros indicadores. por ejemplo, el tipo de radiosonda en la sexta columna (aunque sólo en los datos GTS) o las unidades de media del viento en la columna 7, que en este caso son nudos (kt). También podría expresarse en decenas de $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (ms). Un nudo (kt) es equivalente a $1.853 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ o a $0.515 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

9	10140	67	192	179	270	2
4	10000	182	176	168	275	5
4	9250	845	134	132	10	8
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.

El resto de la filas contienen los datos meteorológicos propiamente dichos de cada uno de los niveles sondeados. Cada fila es un nivel. En la primera columna de cada fila de datos existe una cifra de encabezamiento que nos indica información a cerca de ese nivel. Un 4 indica que nos encontramos ante un nivel isobárico tipo obligatorio, un 5 indica que es un punto notable significativo, un 6 nivel de viento pero solo en los (GTS y fusionados), un 7 nivel de la tropopausa, un 8 el nivel de velocidad máxima del viento y un 9 que nos encontramos ante el nivel de la superficie.

En la segunda columna de las filas de datos se encuentra la presión del nivel de la columna en décimas de hPa. En la tercera columna la altitud en metros. En la cuarta columna la temperatura del entorno en décimas de grados Celsius. En la quinta columna la temperatura de rocío en décimas de grados Celsius; directamente sin tener que restar ningún decremento de rocío a la temperatura. En la sexta columna la dirección del viento y en la séptima la velocidad del viento en nudos (kt).

Podemos comprobar en el ejemplo que para 850 hPa la altura geopotencial es 1562 m, la temperatura $14,8^\circ \text{C}$ y la temperatura de rocío $7,8^\circ \text{C}$.

El formato de los archivos RAOB es más claro que los archivos TEMP sobre todo en el caso de las temperaturas y temperaturas de rocío. Por ello en muchas ocasiones se ha recurrido a este base de datos para el estudio de los radiosondeos rutinarios.

Otra base de datos consultada para obtener información sobre radiosondeos es una de libre acceso en internet publicada por la **Universidad de Wyoming**. Se trata de un archivo sencillo de interpretar en el que se aporta la información básica para nuestro estudio. A continuación presentamos el ejemplo del 7 de septiembre de 2000 en La Coruña:

08001 La Coruna Observations at 00Z 07 Sep 2000

PRES HGHT TEMP DWPT RELH MIXR DRCT SKNT THTA THTE THTV

hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1014.0	67	19.2	17.9	92	12.89	270	2	291.2	327.7	293.4
1000.0	182	17.6	16.8	95	12.18	275	6	290.8	325.2	292.9
925.0	845	13.4	13.2	99	10.41	10	8	293.0	322.9	294.8
919.0	900	14.5	9.6	73	8.23	10	10	294.6	318.6	296.1
915.0	937	15.2	7.2	59	7.01	8	10	295.8	316.4	297.0
909.0	993	14.4	13.0	91	10.45	5	10	295.5	325.8	297.4
872.0	1345	13.6	11.1	85	9.60	346	10	298.2	326.4	299.9
870.0	1365	13.9	10.3	79	9.13	345	10	298.7	325.7	300.4
862.0	1443	15.2	7.2	59	7.44	320	10	300.9	323.2	302.2
857.0	1492	15.0	7.5	60	7.62	305	10	301.2	324.0	302.6
852.0	1542	14.9	7.7	62	7.79	315	10	301.5	324.9	302.9
850.0	1562	14.8	7.8	63	7.87	305	10	301.6	325.3	303.1
849.0	1572	14.8	7.4	61	7.68	300	10	301.7	324.8	303.1
845.0	1612	14.7	6.0	56	6.98	315	10	302.1	323.2	303.4
841.0	1652	14.7	4.5	51	6.33	300	10	302.4	321.7	303.6
835.0	1713	14.6	2.3	43	5.45	305	10	303.0	319.7	304.0
833.0	1733	14.6	1.6	41	5.18	305	10	303.2	319.1	304.1
829.0	1774	14.2	7.2	63	7.74	304	10	303.2	326.6	304.6
815.0	1917	14.2	2.1	44	5.48	300	10	304.6	321.6	305.6

802.0	2053	14.2	-2.8	31	3.90	308	10	306.1	318.4	306.8
774.0	2351	12.6	-9.8	20	2.36	325	10	307.5	315.2	307.9
746.0	2660	11.0	-17.0	12	1.36	305	10	309.0	313.6	309.2
733.0	2806	10.3	-11.1	21	2.25	295	10	309.7	317.2	310.2
720.0	2955	9.6	-5.0	35	3.68	285	14	310.5	322.4	311.2
717.0	2989	9.4	-3.6	40	4.11	291	14	310.7	323.9	311.5
708.0	3094	9.2	-13.3	19	1.95	310	14	311.6	318.1	312.0
704.0	3141	9.1	-17.6	13	1.37	300	12	312.0	316.7	312.3
700.0	3188	9.0	-22.0	9	0.94	320	12	312.4	315.7	312.6
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Station information and sounding indices

Station number: 8001

Observation time: 000907/0000

Station latitude: 43.36

Station longitude: -8.41

Station elevation: 67.0

Showalter index: 5.97

Lifted index: 6.15

LIFT computed using virtual temperature: 6.10

SWEAT index: 124.68

K index: -0.70

Cross totals index: 15.50

Vertical totals index: 22.50

Totals totals index: 38.00

Convective Available Potential Energy: 2.21

CAPE using virtual temperature: 3.31

Convective Inhibition: 0.00

CINS using virtual temperature: 0.00

Equilibrium Level: 922.63

Equilibrium Level using virtual temperature: 921.23

Level of Free Convection: 959.38

LFCT using virtual temperature: 962.51

Bulk Richardson Number: 0.31

Bulk Richardson Number using CAPV: 0.46

Temp [K] of the Lifted Condensation Level: 289.12

Pres [hPa] of the Lifted Condensation Level: 974.23

Mean mixed layer potential temperature: 291.30

Mean mixed layer mixing ratio: 11.86

1000 hPa to 500 hPa thickness: 5708.00

Precipitable water [mm] for entire sounding: 30.73

La primera fila aporta información sobre la estación de la red de la OMM que se trata y el momento del radiosondeo. Posteriormente por columnas nos aportan los datos de radiosondeo para todos los niveles disponibles en ese día, ordenados de mayor a menor nivel de presión por filas. Entre todos los niveles se encuentran los niveles tipo de nuestro interés. Las cuatro primeras columnas son las de más utilidad ya que proporcionan el nivel bórico en hPa, el geopotencial en m, la temperatura en ° C y la temperatura de rocío en ° C, respectivamente. En otras columnas se aporta información sobre la humedad (relativa y proporción de mezcla), módulo y dirección del viento, etc. A 850 hPa la altura geopotenciales 1562 m, la temperatura 14.8 ° C y la temperatura de rocío 7.8 ° C.

En un segundo bloque estos archivos dan información sobre la ubicación exacta en coordenadas de la estación y datos sobre diversos índices.

Lo más destacable de este tipo de archivos, además de la información de radiosondeo, es que proporcionan datos sobre diferentes índices meteorológicos calculados de forma rutinaria como son : el Lifted, K index, Total Totals, Showalter, CAPE, CIN, etc. En este trabajo también ha sido utilizada esta tipo de información sobre los índices meteorológicos.

No podríamos pasar por alto una información muy interesante que aportan estos archivos y que puede ser de mucho interés en posibles análisis aerológicos. Es el caso

de los diferentes niveles de condensación de la columna como son el LFC (nivel de libre convección) y el EL (nivel de equilibrio). Son datos que también han sido utilizados en nuestro estudio para completar la evaluación del riesgo de incendios y optimizar el modelo GD.

Sea cual sea la base de datos que utilicemos para aplicar el modelo GD requerimos concretamente los datos referidos a la temperatura, temperatura de rocío y geopotencial a 700 y 850 hPa. Son los valores necesarios para el cálculo del Potencial de Montgomery (S) a 700 y 850 hPa y para el cálculo de h^* y h a 850 hPa. El porqué de escoger GD estos dos niveles 700 y 850 hPa alejados de la superficie es para tomar el estado de fondo en el que se encuentra la atmósfera, si medimos en el suelo perdemos la sensación de cómo está la atmósfera en sí misma. No queremos que existan perturbaciones que puedan provocar la orografía y el caldeo solar. Cualquier mediada en superficie va a tener más variabilidad que si la tomamos a un nivel superior. Si la medimos más alta va a tener más homogeneidad, y además más amplio será su área de representatividad. El cono de representatividad del dato tomado a 850 hPa abarca un área de mesoescala (Jansá 1988). (Ver Fig. V.1.1.1.)

Fig. V.1.1.1. Cono de significación de escala meso.

En la base de datos considerada en esta tesis para el estudio de las condiciones atmosféricas se parte de radiosondeos obtenidos rutinariamente a las 00:00 h hora local (LST), que en España coincide con el horario UTC. No obstante en ocasiones se ha

tenido que recurrir por falta de datos a las 00:00 h (LST), a información a las 6:00 h (LST), o a las 12:00 h (LST), por proximidad horaria dentro del día en cuestión. Las 00:00 h LST se considera la hora más apropiada para captar el estado de fondo de la columna atmosférica sin perturbaciones debidas al caldeo solar. Pero en caso de no estar disponible, tomamos el más próximo, como el de las 12:00 h, admitiendo los errores que pueden producirse debido al ruido generado por las perturbaciones que el la atmósfera puede causar el calentamiento por la radiación diurna en superficie.

Los radiosondeos rutinarios utilizados para el desarrollo de nuestros estudios han sido los de la estación de La Coruña, y también se han estudiado excepcionalmente datos de la estación de Madrid Barajas (08221) o Lisboa(08579). La finalidad ha sido realizar distintas validaciones espaciotemporal del modelo y estudios comparativos del modelo GD con otros índices (ver capítulo VI).

En otros estudios aerológicos, realizados a lo largo de esta tesis, concretamente centrados en los radiosondeos de La Coruña, o Madrid-Barajas, hemos necesitado calcular los valores de **S**, **h** y **h***, para más niveles de la columna atmosférica, y para ello, hemos tomado datos de temperatura, temperatura de rocío y geopotencial relativos a todos los niveles de presión presentes en el radiosondeo, o a determinados niveles tipo 1000, 850, 700, 500 y 300 hPa. Todo ello para evaluar la situación de la estructura vertical de la atmósfera desde 1000 hasta 300 hPa a las 00:00 h.

A partir de estos datos podemos:

- Tener información de la estabilidad y de la humedad de otros estratos diferentes de la columna a los que maneja el modelo GD.
- Estudiar cual es el estado de estabilidad y humedad global de la columna atmosférica

En los archivos de datos de radiosondeo, tanto en los RAOB como en los TEMP, como en los Wyoming, a veces nos encontramos con lagunas de ausencia de datos. Puede ser debido a un error de funcionamiento en algún dispositivo de medida, del receptor de señal, etc. Un radiosondeo es un método de observación remota y algún día puede existir un *lack* debido a fallos en el registro de datos. Ante esos casos no existe un

procedimiento 100 % fiable que nos dé cuál fue el dato real, pero es necesario realizar un análisis de datos para completar la laguna de ese día en la aplicación de nuestro modelo GD. Nosotros hemos optado por suponer que en ese sesgo los valores no han variado mucho de un día para otro, y por ello, tomamos como datos válidos la interpolación entre los valores del día anterior y posterior en cada nivel. Puede ocurrir también que la laguna sea de varios días, en ese caso también obtenemos el valor por interpolación, pero con un mayor riesgo ya que podría darse el caso de que tratándose de un intervalo de días mayor, el valor de las variables meteorológicas es más fácil que cambie. Ahora bien, ese riesgo es asumido, ya que en general no se han observado grandes estridencias en los valores de las variables pertenecientes a los días que han sido sondeados correctamente.

V.1.2. Otros datos consultados

Otras bases de datos meteorológicas han sido consultadas para diversos apartados de la tesis. Por ejemplo a la hora de realizar análisis sinópticos y el estudio del efecto dipolar son necesarios mapas del campo de presiones en superficie. En una bases de datos de libre acceso perteneciente al Servicio Meteorológico Alemán (Wetter Zentrale) se han extraído, para aquellos días en los que se ha hecho necesario un análisis sinóptico o un estudio dipolar, los mapas en superficie elaborados por el Met Office del Reino Unido.

En la base de datos de la Universidad de Wyoming además de información sobre datos de radiosondeo pueden extraerse representaciones aerológicas del diagrama de Stüve, que en ocasiones han podido ser útiles para complementar los análisis aerológicos S(p) que se han realizado en días concretos del periodo estudiado. De aquí han sido obtenidos también datos sobre índices meteorológicos (KI, TTI, SI, LI, CAPE, etc) para el estudio comparativo con el modelo GD.

Los datos sobre *nivel de libre convección* y *nivel de equilibrio* también han sido utilizados para el estudio aerológico de días concretos cuando el análisis de la columna requería mayor precisión para la determinación del riesgo de fuego.

V.1.3. Datos de Precipitación

En algún momento de la elaboración de esta tesis se han requerido datos sobre la precipitación caída en superficie en cuatro estaciones gallegas, cada una correspondiente a una de las provincias de Galicia.

Los datos meteorológicos ha sido solicitados al Centro Territorial de Galicia del Instituto Nacional de Meteorología para evaluar la presencia o ausencia de precipitación en cada una de las cuatro provincias Gallegas. Las estaciones analizadas han sido:

1387-Estación Completa A Coruña.

Latitud: 43' 22" N. Longitud 8' 25" O. Altitud: 67 m.

1505-Aeródromo Rozas Lugo.

Latitud: 43' 06" N. Longitud 7' 27" O. Altitud: 44 m.

1690A-Granxa Deputacion Ourense.

Latitud: 42' 19" N. Longitud 7' 51" O. Altitud: 150 m.

1484C- Pontevedra-Mourente.

Latitud: 42' 26" N. Longitud 8' 37" O. Altitud: 107 m.

Los datos de precipitación concretamente son utilizados para análisis comparativos del modelo GD con otros modelos de riesgo de fuego como el Canadiense, así como para evaluaciones diarias concretas de la existencia de precipitación en superficie (agua precipitada).

V.2. Datos de Incendios

Para la elaboración de este trabajo de investigación otro gran cuerpo de datos necesario es el del número de incendios diarios. En la elaboración inicial del modelo GD fueron necesarios datos del número de incendios diarios en Galicia durante el periodo 1981-1985. Posteriores validaciones se prolongan hasta finales de los 90 y principios del siglo

XXI en el que fueron utilizados datos del número de incendios de Galicia así como de las provincias occidentales de Castilla y León.

En esta tesis no sólo se trata de validar el modelo desde un punto de vista temporal, sino también espacialmente. Por lo que a parte de tener en cuenta los incendios acontecidos en Galicia y oeste de Castilla y León, en este trabajo, también han sido incorporados incendios de Madrid, Extremadura y Guadalajara para aplicar el modelo en zonas continentales.

Trabajamos principalmente durante dos periodos en continuo. Una estación de fuego invernal que va desde el 1 de febrero hasta el 31 de marzo de cada año estudiado, y otra estación de fuego en verano desde el 1 de julio hasta el 30 de septiembre. Para cada uno de esos días los incendios son contabilizados por provincias en la región de estudio.

Fig. V.2.1. Provincias objeto de estudio en el que serán contabilizados el número de incendios diarios.

Este equipo investigador ha extraído el número de incendios registrados diarios hasta la actualidad (según disponibilidad) durante las dos estaciones de fuego en Galicia y Oeste de Castilla y León, y de manera novedosa en este trabajo durante el verano en Cáceres, Badajoz, Comunidad de Madrid y Guadalajara. El objetivo en todo caso ha sido mantener validado temporalmente el modelo GD y ampliar la validación espacial del modelo.

La base de datos que ha utilizado este equipo investigador es la base INCENPAR gestionada actualmente por el Ministerio de Medio Ambiente, dentro de la Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad, en la Dirección General de la Biodiversidad, Subdirección General de Política Forestal y Desertificación. Dicha base de datos se nutre de los “Partes de incendio” elaborados en España para cada uno de los incendios que acontecen en su territorio.

Los archivos de INCENPAR son anuales, incluyendo el total de los incendios acontecidos en España en ese año. Constan de una amplia información de la que nosotros sólo requerimos parte. Cada incendio es una fila identificado por un número de parte. Por columnas se aporta el código de la comunidad autónoma, el de la provincia, el nombre de la provincia, etc. Del total de campos aportados de nuestro interés son : la provincia, la fecha de inicio, la hora de inicio, y en algunos casos pueden interesarnos datos de superficies quemadas. La fecha y la provincia son los campos más importantes porque nos permiten ordenar cronológicamente todos los incendios acontecidos en una provincia determinada y contabilizarlos por días. De esta forma sabemos el número de incendios que han tenido lugar en cada provincia de estudio a lo largo de los dos periodos estudiados. En un principio nosotros tenemos en cuenta todos los incendios independientemente de su origen o su tamaño. Lo que pretendemos estudiar es la aparición del fuego, y por eso no hacemos ningún tipo de exclusión.

Datos del número de incendios diarios acontecidos en la ciudad de Salamanca también son utilizados en esta tesis para compararlos con el número de incendios de la provincia. Estos han sido proporcionados por el Parque de Bomberos de la Ciudad de Salamanca.

CAPÍTULO VI:
ÍNDICES DE RIESGO DE FUEGO: ANÁLISIS
COMPARATIVOS

Mientras los capítulos anteriores se han referido a condiciones de contorno conceptuales, legales, etc, en este capítulo vamos a entrar en el problema del fuego de forma específica. Para empezar vamos a considerar el modelo GD como base principal de uso operativo para buscar la mejor solución al problema, esto es, la predicción del fuego. También, otros índices de riesgo serán analizados y valorados. En todo caso hemos procurado mantener un absoluto equilibrio entre el rigor que la física conlleva y la simplicidad a que todo modelo operativo de predicción de siniestros obliga.

VI.1. El modelo GD

Dada la situación de la problemática en incendios forestales en el noroeste de la Península Ibérica, el grupo investigador empezó a analizar el problema del fuego en términos formales de columna atmosférica, materia sobre la cual habían acumulado experiencias en trabajos anteriores. Curiosamente otro índice de naturaleza similar se estaba gestando casi simultáneamente en USA, Haines (1988).

La hipótesis de partida era admitir el fuego como un proceso vertical, y en consecuencia tratar de explicarlo con el formalismo típico del desarrollo vertical local. Ya resultó evidente desde el inicio que los dos parámetros a conjugar eran la estabilidad y la humedad de los bajos niveles troposféricos. Como hemos señalado el grupo investigador tenía acumulada experiencia en el uso de potenciales energéticos (S , h y h^*) y trataron de abordar el problema con ese mismo formalismo.

Muchas experiencias, proyectos, publicaciones y trabajos académicos han estado centrados tanto en el propio modelo *per se* como en sus aplicaciones prácticas.

Como resulta lógico pensar, se ha ido avanzando en múltiples aspectos y en este trabajo vamos a presentar los más recientes. Es por ello que la descripción del modelo será, en el contexto de este trabajo, un paso en el que no profundizaremos demasiado por su conocimiento y difusión sobrados.

VI.1.1 Base física.

Como se sabe el modelo establece una partición en tipos de día tal y como se presenta en la figura VI.1.1.1.

Fig. VI.1.1.1. Esquema Modelo GD: Tipos de Día, valores umbrales de e y D.

De acuerdo a esta clasificación un día puede presentar cuatro tipificaciones que se denotan como tipos I, II, III y IV. Esta denominación numérica romana en modo alguno debe entenderse en sentido numérico ya que sólo es una denominación puramente semántica.

El factor de estabilidad (**e**) es un parámetro de estrato que viene dado por la ecuación:

$$e = S_{700} - S_{850}$$

$$e = S_{700} - S_{850} = C_p \cdot (T_{700} - T_{850}) + g \cdot (z_{700} - z_{850}) \quad (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (\text{VI.1.1.1})$$

Y viene a significar en forma discreta la estabilidad del estrato 850-700 hPa en dimensiones de energía por unidad de masa. Estadísticamente se establece un valor medio de $e = 6 \text{ kJ/kg}$ para la zona de Galicia. Valores de **e** iguales o inferiores a dicho valor vienen a caracterizar en un abuso del lenguaje los denominados días inestables (I y II); para los días en que **e** supera ese valor se habla de días estables (III y IV).

En cuanto a la humedad el modelo considera el déficit de saturación (**D**) a 850 hPa:

$$D = (h^* - h)_{850} \quad (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (\text{VI.1.1.2.})$$

El valor medio estadístico de **D** es 12 J/kg y para aquellos días con valores iguales o superiores a 12 estaremos hablando de días secos (I y III); y para los días inferiores a dicho valor estaremos hablando de días húmedos (II, IV).

En definitiva, conociendo la diada (**e**, **D**) de un día sabremos el tipo de día. La evaluación se hace a las 00:00 horas ya que como es bien sabido las perturbaciones por caldeoamiento local quedan eliminadas.

En la bibliografía existen muchas formas de representar tanto el campo de estabilidad como el de humedad, pero la ventaja del uso de los potenciales permite describir el proceso en las mismas dimensiones y unidades.

Ya desde los primeros experimentos se observó una ordenación de riesgos de aparición de fuego tal y como se presenta en la tabla VI.1.1.1

Tabla VI.1.1.1. Modelo GD: Tipos de Día, valores umbrales de **e** y **D** y riesgo asociado

Tipo de día	Denominación	e (kJ/ kg)	D (kJ/ kg)	NDFR	RIESGO asociado
I	<i>Inestable Seco</i>	≤ 6	≥ 12	4	MUY ALTO
II	<i>Inestable Húmedo</i>	≤ 6	< 12	1	BAJO
III	<i>Estable Seco</i>	> 6	≥ 12	3	ALTO
IV	<i>Estable Húmedo</i>	> 6	< 12	2	MEDIO

De forma cuantitativa se establecieron los pesos normalizados de riesgo (NDFR) que aparecen en la mencionada tabla. Estos normalizadores fueron obtenidos, y registrados bibliográficamente (García Díez et al, 1994a), y el transcurso de los casi 15 años posteriores no han venido sino a confirmar dichos valores. No es este el lugar para considerar lo que ello significa pero puede intuirse fácilmente que es la superación de una auténtica prueba de fuego en la calidad predictiva del modelo.

En otro orden de cosas otro de los aspectos desarrollados del modelo, también recogido bibliográficamente hace varios años, lo constituía el conjunto de las ecuaciones de predicción del número de incendios, abordado también en este trabajo. La ecuación genérica de predicción es :

$$PNF(d) = \left[0.7 \cdot \frac{RNF(d-1)}{NDFR_{(d-1)}} + 0.3 \cdot \frac{RNF(d-2)}{NDFR_{(d-2)}} \right] \cdot NDFR_{(d)} \quad (VI.1.1.3.)$$

Lo más destacable del modelo en cuanto a ordenación de riesgos está relacionado con el singular papel que juega la estabilidad atmosférica, auténtico caballo de batalla en nuestra concepción del fuego. Dicha singularidad radica en el hecho de que la baja estabilidad favorece la aparición del fuego pero sólo en el dominio seco, actuando en sentido contrario en el dominio húmedo. Esta es una cuestión de crucial importancia como veremos más adelante.

Los días tipo II, que conllevan el menor riesgo de aparición de fuego son los que pueden llevarnos al peor tipo de error de predicción: *Under prediction*. Decimos esto porque en problemas relativos a siniestros como el que aquí abordamos los errores de predicción (por defecto o por exceso) no son simétricos, esto es, una sobre predicción (Falsa alarma) siempre es asumida mientras que una predicción por defecto (*Under prediction*) conlleva un fracaso rotundo. Eso significa que los días tipo II deben ser minuciosamente estudiados y a ello nos referiremos en el capítulo X.

VI.1.2. Validación

a) Validación cualitativa:

Todos los trabajos que se han realizado han contemplado la validación al presente del modelo, como no podría ser de otra forma. Sobradas razones podríamos dar nosotros para ello, pero traemos aquí el comentario del investigador norteamericano B.E. Potter:”.. *Los modelos deben de ser validados en periodos posteriores e inconexos a los de su parametrización.*” (Potter et al , 2003). A tal efecto en la tabla VI.1.2.1 se incluyen el número de incendios en Galicia contemplado en una validación que hacemos en este trabajo, referidos al periodo estival (julio, agosto y septiembre).

Tabla VI.1.2.1. Incendios en Galicia en el periodo estival desde 1998 hasta 2005.

Año	Número de Incendios
1998	8968
1999	4688
2000	7181
2001	4984
2002	6358
2003	5345
2004	3849
2005	5537
media	5863
total	46910

Que sepamos, muy pocos trabajos recogen una muestra tan significativa de eventos.

Los resultados de la validación para Galicia durante el periodo 1998-2005, utilizando el radiosondeo de La Coruña, se presentan en la tabla IV.1.2.2., en los que para cada campaña estival (del 1 de julio al 30 de septiembre) se representan en cada tipo los números de incendios (f), número de días(d) y media diaria (DFR) de incendios para cada campaña. Los valores normalizados(NDFR) representan el peso relativo para cada tipo de su DFR medio (de todo el periodo) frente a la suma total de los DFR medios (de todo el periodo)de todos los tipos.

En las tablas VI.1.2.3 a VI.1.2.6. se presentan los mismos resultados de verano para el periodo citado en Galicia pero desglosados por provincias.

Diariamente los valores de temperatura, geopotencial, temperatura de rocío de cada nivel estándar, la diada (**e, D**) y el tipo de día GD para las estación de verano durante todos los años del periodo 1998-2006 en La Coruña, así como el número de incendios diarios en Galicia y cada una de sus provincias(sólo hasta 2005), pueden consultarse detalladamente en el anexo II.

Tabla VI.1.2.2. Valores para el periodo estival 1998-2005 (ver texto)en Galicia

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	4010	26	154.23	129	4	32.25	3337	28	119.18	1492	34	43.88
1999	1461	19	76.89	274	13	21.08	1391	21	66.24	1562	39	40.05
2000	2077	17	122.18	295	11	26.82	2276	20	113.80	2533	44	57.57
2001	1264	16	79.00	202	9	22.44	2149	20	107.45	1369	47	29.13
2002	1154	11	104.91	285	9	31.67	2153	20	107.65	2766	52	53.19
2003	2314	24	96.52	256	6	42.67	1513	21	72.05	1262	41	30.78
2004	1349	16	84.31	57	8	7.13	1000	20	50.00	1443	48	30.06
2005	1758	19	92.53	0	1	0.00	1667	30	55.57	2112	42	50.29
Total	15387	148		1498	61		15486	180		14539	347	
DFR (medio)	101.31			23.01			86.49			41.87		
NDFR	0.4			0.1			0.3			0.2		

Tabla VI.1.2.3. Resultados anuales en verano en el periodo 1998-2005 en La Coruña.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	870	26	33.46	25	4	6.25	757	28	27.04	198	34	5.82
1999	436	19	22.95	75	13	5.77	373	21	17.76	329	39	8.44
2000	349	17	20.53	7	11	0.64	349	20	17.45	335	44	7.61
2001	382	16	23.88	40	9	4.44	663	20	33.15	347	47	7.38
2002	264	11	24.00	60	9	6.67	560	20	28.00	538	52	10.35
2003	452	24	18.83	41	6	6.83	314	21	14.95	205	41	5.00
2004	379	16	23.69	17	8	2.13	253	20	12.65	343	48	7.15
2005	563	19	29.63	0	1	0.00	481	30	16.03	440	42	10.48
Total	3695	148		265	61		3750	180		2735	347	
DFR (medio)	24.62			4.09			20.87			7.77		
NDFR	0.43			0.07			0.36			0.13		

Tabla VI.1.2.4. Resultados anuales en verano en el periodo 1998-2005 en Lugo.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	583	26	22.42	8	4	2.00	356	28	12.71	324	34	9.53
1999	239	19	12.58	30	13	2.31	216	21	10.29	247	39	6.33
2000	381	17	22.41	37	11	3.36	397	20	19.85	419	44	9.52
2001	154	16	9.53	25	9	2.78	171	20	8.55	154	47	3.28
2002	167	11	15.18	46	9	5.11	229	20	11.45	354	52	6.81
2003	478	24	19.92	90	6	15.00	315	21	15.00	293	41	7.15
2004	144	16	9.00	7	8	0.88	112	20	5.60	188	48	3.92
2005	240	19	12.63	0	1	0.00	193	30	6.43	245	42	5.83
Total	2386	148		243	61		1989	180		2224	347	
DFR (medio)	15.45			3.93			11.23			6.54		
NDFR	0.41			0.10			0.30			0.18		

Tabla VI.1.2.5. Resultados anuales en verano en el periodo 1998-2005 en Pontevedra.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	1123	26	43.19	46	4	11.50	1189	28	42.46	349	34	10.26
1999	370	19	19.47	83	13	6.38	380	21	18.10	360	39	9.23
2000	551	17	32.41	36	11	3.27	466	20	23.30	595	44	13.52
2001	304	16	19.00	27	9	3.00	576	20	28.80	328	47	6.98
2002	362	11	32.91	95	9	10.56	800	20	40.00	899	52	17.29
2003	644	24	26.83	35	6	5.83	322	21	15.33	299	41	7.29
2004	432	16	27.00	13	8	1.63	333	20	16.65	456	48	9.50
2005	457	19	24.05	0	1	0.00	489	30	16.30	636	42	15.14
Total	4243	148		335	61		4555	180		3922	347	
DFR (medio)	28.10			5.27			25.11			11.15		
NDFR	0.40			0.07			0.36			0.16		

Tabla VI.1.2.6. Resultados anuales en verano en el periodo 1998-2005 en Orense.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	1434	26	55.15	50	4	12.50	1035	28	36.96	621	34	18.26
1999	416	19	21.89	86	13	6.62	422	21	20.10	626	39	16.05
2000	796	17	46.82	215	11	19.55	1064	20	53.20	1184	44	26.91
2001	424	16	26.50	110	9	12.22	739	20	36.95	540	47	11.49
2002	361	11	32.82	84	9	9.33	564	20	28.20	975	52	18.75
2003	740	24	30.83	90	6	15.00	562	21	26.76	465	41	11.34
2004	394	16	24.63	20	8	2.50	302	20	15.10	456	48	9.50
2005	498	19	26.21	0	1	0.00	504	30	16.80	791	42	18.83
Total	5063	148		655	61		5192	180		5658	347	
DFR (medio)	33.10			9.71			29.25			16.39		
NDFR	0.37			0.11			0.33			0.18		

Comentario: Los resultados son espectaculares ya que manteniendo escrupulosamente el sentido de la afirmación de B.E. Potter, citada anteriormente, reproducimos valores absolutamente concordantes con los obtenidos anteriormente. En particular los posteriores a 2003 son genuinos de este trabajo. El que ello sea así debe interpretarse en sus justos términos: No se trata de confirmar un hecho científico en el que se mantienen sus condiciones de contorno o condiciones de laboratorio; se trata de que la ocurrencia de incendios, ante la que se estrenan de continuo técnicas, se agrandan presupuestos, se modifican legislaciones, etc, sigue manteniendo perfecta coherencia con el simple análisis meteorológico. ¿No será éste el mejor argumento para admitir que la ocurrencia de incendios silvestres está regulada cuasi-exclusivamente por la meteorología?.

A esta pregunta dele el lector la respuesta que quiera pero parece conveniente recordar aquí la famosa hipótesis cero considerada por el grupo ya hace muchos años:

“... los incendios pueden ser debidos a infinitas causas, pero sólo acontecerán cuando las condiciones meteorológicas sean las oportunas”.

Una validación similar puede realizarse con el radiosondeo de La Coruña para el mismo periodo 1998-2005 durante la época invernal (febrero y marzo), para los incendios de Galicia (tabla VI.1.2.7) y de cada una de sus provincias (tablas VI.1.2.8 a VI.1.2.11). En el anexo III pueden consultarse detalladamente los resultados diarios.

Tabla VI.1.2.7. Valores para el periodo invernal 1998-2005 (ver texto) en Galicia

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	1028	10	102,80	461	7	65,86	738	10	73,80	1488	32	46,50
1999	430	6	71,67	176	15	11,73	745	9	82,78	792	29	27,31
2000	2341	18	130,06	746	12	62,17	379	6	63,17	188	24	7,83
2001	201	7	28,71	104	15	6,93	3	3	1,00	180	34	5,29
2002	1084	11	98,55	116	9	12,89	192	4	48,00	834	35	23,83
2003	425	6	70,83	318	18	17,67	21	2	10,50	240	33	7,27
2004	363	9	40,33	544	13	41,85	373	9	41,44	1340	29	46,21
2005	1063	7	151,86	897	21	42,71	155	2	77,50	1500	29	51,72
Total	6935	74		3362	110		2606	45		6562	245	
DFR (medio)			86,85			32,73			49,77			27,00
NDFR			0.4			0.2			0.3			0.1

Tabla VI.1.2.8. Resultados anuales en invierno en el periodo 1998-2005. La Coruña.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	191	10	19.10	99	7	14.14	107	10	10.70	288	32	9.00
1999	82	6	13.67	23	15	1.53	142	9	15.78	80	29	2.76
2000	502	18	27.89	165	12	13.75	79	6	13.17	8	24	0.33
2001	52	7	7.43	23	15	1.53	0	3	0.00	46	34	1.35
2002	252	11	22.91	46	9	5.11	29	4	7.25	60	35	1.71
2003	100	6	16.67	53	18	2.94	5	2	2.50	64	33	1.94
2004	53	9	5.89	144	13	11.08	94	9	10.44	333	29	11.48
2005	197	7	28.14	126	21	6.00	11	2	5.50	143	29	4.93
Total	1429	74		679	110		467	45		1022	245	
DFR (medio)	17.71			7.01			8.17			4.19		
NDFR	0.48			0.19			0.22			0.11		

Tabla VI.1.2.9. Resultados anuales en invierno en el periodo 1998-2005. Lugo.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	100	10	10.00	73	7	10.43	97	10	9.70	196	32	6.13
1999	42	6	7.00	13	15	0.87	70	9	7.78	41	29	1.41
2000	297	18	16.50	96	12	8.00	42	6	7.00	20	24	0.83
2001	19	7	2.71	7	15	0.47	2	3	0.67	11	34	0.32
2002	95	11	8.64	17	9	1.89	17	4	4.25	93	35	2.66
2003	50	6	8.33	42	18	2.33	0	2	0.00	41	33	1.24
2004	52	9	5.78	44	13	3.38	43	9	4.78	96	29	3.31
2005	72	7	10.29	63	21	3.00	6	2	3.00	49	29	1.69
Total	727	74		355	110		277	45		547	245	
DFR (medio)	8.66			3.80			4.65			2.20		
NDFR	0.45			0.20			0.24			0.11		

Tabla VI.1.2.10. Resultados anuales en invierno en el periodo 1998-2005. Pontevedra.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	323	10	32.30	165	7	23.57	248	10	24.80	489	32	15.28
1999	106	6	17.67	66	15	4.40	194	9	21.56	248	29	8.55
2000	592	18	32.89	149	12	12.42	95	6	15.83	16	24	0.67
2001	68	7	9.71	39	15	2.60	0	3	0.00	57	34	1.68
2002	234	11	21.27	25	9	2.78	40	4	10.00	168	35	4.80
2003	120	6	20.00	99	18	5.50	10	2	5.00	65	33	1.97
2004	65	9	7.22	167	13	12.85	103	9	11.44	433	29	14.93
2005	356	7	50.9	325	21	15.5	54	2	27.00	576	29	19.9
Total	1864	74		1035	110		744	45		2052	245	
DFR (medio)	23.99			9.95			14.45			8.47		
NDFR	0.42			0.17			0.25			0.15		

Tabla VI.1.2.11. Resultados anuales en invierno en el periodo 1998-2005. Orense.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	414	10	41.40	124	7	17.71	286	10	28.60	515	32	16.09
1999	200	6	33.33	74	15	4.93	339	9	37.67	423	29	14.59
2000	950	18	52.78	336	12	28.00	163	6	27.17	144	24	6.00
2001	62	7	8.86	35	15	2.33	1	3	0.33	66	34	1.94
2002	503	11	45.73	28	9	3.11	106	4	26.50	513	35	14.66
2003	155	6	25.83	124	18	6.89	6	2	3.00	70	33	2.12
2004	193	9	21.44	189	13	14.54	133	9	14.78	478	29	16.48
2005	438	7	62.57	383	21	18.24	84	2	42.00	732	29	25.24
Total	2915	74		1293	110		1118	45		2941	245	
DFR (medio)	36.49			11.96			22.50			12.14		
NDFR	0.44			0.14			0.27			0.15		

Una somera comparación entre los resultados estivales e invernales nos lleva a pensar que mientras la ordenación de riesgos en aquellos es coherente con nuestra teoría no lo es tanto para el segundo caso. El desajuste aparece en la parte baja del nivel de riesgo, esto es, en la ordenación (IV, II). Ello tiene, a nuestro juicio una fácil interpretación: el papel de la inestabilidad sobre el riesgo de fuego en dominios húmedos es débil en escenarios térmicos bajos. Como se sabe la contribución latente del vapor de agua es tanto menos efectiva cuanto que la temperatura sea más baja. Curiosamente Orense (la más interior y menos húmeda de las provincias gallegas) en invierno sí verifica el modelo.

b) Validación cuantitativa:

Desde este punto de vista la validación del modelo resulta plenamente satisfactoria. En las figuras VI.1.2.1 y VI.1.2.2 se presentan las predicciones diarias establecidas a las 00:00 horas frente a los respectivos registros para el verano de 2004 en Galicia.

Figura. VI.1.2.1. Bondad en la predicción a las 00:00 h del número de incendios para el día d. Verano 2004.

Figura. VI.1.2.2. Evolución temporal del número de incendios predichos y registrados para el día d a las 00:00 h. Verano 2004.

Como puede observarse en la figura VI.1.2.1 las mayores dispersiones puntuales con respecto a la recta de correcta predicción están en la zona de falsa alarma, lo cual es más aceptable en sentido operativo. En cuanto a la figura VI.1.2.2 podemos ver que las gráficas de predicción y registro fluyen en el tiempo con bastante paralelismo.

La totalidad de los resultados para verano de todo el periodo 1998-2005, en los diferentes rangos de predicción, pueden consultarse en el anexo IV.

Así mismo en la tabla VI.1.2.12 se presentan los resultados de correlación lineal para las ecuaciones de predicción en diferentes rangos temporales. Los resultados son bastante satisfactorios. Podemos observar en dicha tabla como para todas las campañas la bondad de la predicción va disminuyendo a medida que prolongamos rango de predicción. Cuanto más alargemos la predicción menos fiables serán los resultados. Pero los resultados son bastante significativos incluso para el día d+5 en los que se llega a obtener un valor de coeficiente de correlación de 0,70 en el verano de 2002.

Tabla VI.1.2.12. Correlación incendios registrados-incendios predichos por GD en diferentes rangos de predicción. Verano 1998-2005.

VERANO		PREDICCIÓN (d)	PREDICCIÓN (d+1)	PREDICCIÓN (d+2)	PREDICCIÓN (d+3)	PREDICCIÓN (d+4)	PREDICCIÓN (d+5)
1998	COEF.CORR.	0,87	0,80	0,66	0,58	0,53	0,54
	R2	0,76	0,63	0,43	0,34	0,28	0,29
1999	COEF.CORR.	0,73	0,71	0,68	0,60	0,53	0,45
	R2	0,54	0,50	0,47	0,36	0,28	0,21
2000	COEF.CORR.	0,87	0,81	0,77	0,70	0,61	0,55
	R2	0,75	0,66	0,59	0,50	0,37	0,30
2001	COEF.CORR.	0,82	0,82	0,72	0,64	0,59	0,55
	R2	0,68	0,68	0,52	0,40	0,35	0,30
2002	COEF.CORR.	0,81	0,73	0,70	0,70	0,71	0,70
	R2	0,66	0,54	0,49	0,49	0,51	0,49
2003	COEF.CORR.	0,77	0,69	0,56	0,51	0,46	0,35
	R2	0,59	0,48	0,31	0,26	0,22	0,13
2004	COEF.CORR.	0,91	0,85	0,81	0,75	0,67	0,63
	R2	0,82	0,72	0,65	0,57	0,45	0,40
2005	COEF.CORR.	0,82	0,72	0,55	0,39	0,23	0,17
	R2	0,68	0,52	0,30	0,15	0,05	0,03

En alguno de los trabajos y publicaciones previos a éste, se citaba el alcance espacial en la predicción del modelo. Se trataba, en fin, de verificar el alcance mesoescalar del modelo. Así, resultaría interesante observar el régimen de la aparición de incendios en relación a la tipificación de días asociada al radiosondeo de La Coruña; se trata de comprobar si nos encontramos en el rango alto de la dimensión mesoescalar (cientos de kilómetros). En la tabla VI.1.2.13 se presentan los resultados de fuego en verano (del 1 de julio al 30 de septiembre) para las provincias de León Zamora y Salamanca, curiosamente las más activas de la comunidad autónoma de Castilla y León. Por disponibilidad de datos en este caso también se incluye la campaña de 2006.

Tabla VI.1.2.13. DFR anuales en verano durante el periodo de estudio 1998-2006 en la unidad geográfica de León , Zamora y Salamanca.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	370	26	14,23	13	4	3,25	220	28	7,86	234	34	6,88
1999	232	19	12,21	44	13	3,38	166	21	7,90	288	39	7,38
2000	226	17	13,29	73	11	6,64	286	20	14,30	356	44	8,09
2001	226	16	14,13	51	9	5,67	257	20	12,85	354	47	7,53
2002	80	11	7,27	13	9	1,44	83	20	4,15	229	52	4,40
2003	335	24	13,96	17	6	2,83	144	21	6,86	147	41	3,59
2004	93	16	5,81	16	8	2,00	131	20	6,55	205	48	4,27
2005	181	19	9,53	0	1	0,00	204	30	6,80	256	42	6,10
2006	299	31	9,65	12	7	1,71	127	26	4,88	103	28	3,68
Total	2042	179		239	68		1618	206		2172	375	
DFR (medio)			11,12			2,99			8,02			5,77
NDFR			0,4			0,1			0,3			0,2

En las tablas VI.1.2.14 a VI.1.2.16 se incluyen pormenorizadamente los resultados estivales para la escala provincial. Los resultados estivales del número de incendios diarios y tipo diario para cada una de las campañas de verano desde 1998 hasta 2006, en conjunto, y desglosado por provincias pueden consultarse detalladamente en el anexo V.

Tabla VI.1.2.14. DFR en verano durante el periodo de estudio 1998-2006 en León.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	215	26	8,27	8	4	2,00	147	28	5,25	92	34	2,71
1999	135	19	7,11	31	13	2,38	104	21	4,95	166	39	4,26
2000	120	17	7,06	40	11	3,64	156	20	7,80	193	44	4,39
2001	135	16	8,44	32	9	3,56	141	20	7,05	195	47	4,15
2002	34	11	3,09	7	9	0,78	38	20	1,90	90	52	1,73
2003	163	24	6,79	10	6	1,67	61	21	2,90	63	41	1,54
2004	31	16	1,94	2	8	0,25	44	20	2,20	50	48	1,04
2005	110	19	5,79	0	1	0,00	88	30	2,93	108	42	2,57
2006	139	31	4,48	4	7	0,57	44	26	1,69	35	28	1,25
Total	1082	179		134	68		823	206		992	375	
DFR (medio)			5,88			1,65			4,07			2,63
NDFR			0,41			0,11			0,29			0,18

Tabla VI.1.2.15. DFR en verano durante el periodo de estudio 1998-2006 en Zamora.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	121	26	4,65	5	4	1,25	56	28	2,00	107	34	3,15
1999	61	19	3,21	8	13	0,62	34	21	1,62	85	39	2,18
2000	83	17	4,88	22	11	2,00	98	20	4,90	128	44	2,91
2001	47	16	2,94	10	9	1,11	83	20	4,15	89	47	1,89
2002	27	11	2,45	5	9	0,56	19	20	0,95	85	52	1,63
2003	90	24	3,75	4	6	0,67	57	21	2,71	50	41	1,22
2004	44	16	2,75	7	8	0,88	60	20	3,00	95	48	1,98
2005	42	19	2,21	0	1	0,00	74	30	2,47	87	42	2,07
2006	82	31	2,65	6	7	0,86	37	26	1,42	26	28	0,93
Total	597	179		67	68		518	206		752	375	
DFR (medio)			3,28			0,88			2,40			2,00
NDFR			0,38			0,10			0,28			0,23

Tabla VI.1.2.16. DFR en verano durante el periodo de estudio 1998-2006 en Salamanca.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	34	26	1,31	0	4	0,00	17	28	0,61	35	34	1,03
1999	36	19	1,89	5	13	0,38	28	21	1,33	37	39	0,95
2000	23	17	1,35	11	11	1,00	32	20	1,60	35	44	0,80
2001	44	16	2,75	9	9	1,00	33	20	1,65	70	47	1,49
2002	19	11	1,73	1	9	0,11	26	20	1,30	54	52	1,04
2003	82	24	3,42	3	6	0,50	26	21	1,24	34	41	0,83
2004	18	16	1,13	7	8	0,88	27	20	1,35	60	48	1,25
2005	29	19	1,53	0	1	0,00	42	30	1,40	61	42	1,45
2006	78	31	2,52	2	7	0,29	46	26	1,77	42	28	1,50
Total	363	179		38	68		277	206		428	375	
DFR (medio)			1,96			0,46			1,36			1,15
NDFR			0,40			0,09			0,27			0,23

Los resultados son absolutamente coherentes en todos los aspectos a considerar, por un lado hay concordancia para cada provincia ya que los valores encajan bien dentro de las respectivas series históricas. Por otro lado, la proporción de DFRs en las tres provincias se corresponde a la masa forestal de ellas, siendo más alta en León y más baja en Salamanca. Pero lo más destacable es sin duda observar la coherencia con respecto a los valores de Galicia lo cual habla bien a las claras de que la respuesta al fuego es similar y *síncrona* (recordad que el radiosondeo usado es el de La Coruña a las 00:00 h).

En relación a los incendios de invierno (del 1 de febrero al 31 de marzo) podemos hablar en los mismos términos (tablas VI.1.2.17, VI.1.2.18, VI.1.2.19 y VI.1.2.20). Los resultados detallados se muestran en el anexo VI.

Curiosamente en las tres provincias occidentales de Castilla y León la ordenación de riesgo es correcta en los dos periodos de fuego estudiados. Al ser una región alejada de la costa (como le sucedía a la provincia de Orense) el papel de la inestabilidad sobre el riesgo de fuego juega un importante papel incluso en escenarios térmicos bajos.

Tabla VI.1.2.17. Resultados en invierno en León, Zamora y Salamanca.1998-2006

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	134	10	13,40	17	7	2,43	94	10	9,40	173	32	5,41
1999	88	6	14,67	52	15	3,47	157	9	17,44	216	29	7,45
2000	404	18	22,44	108	12	9,00	90	6	15,00	92	24	3,83
2001	28	7	4,00	11	15	0,73	2	3	0,67	12	34	0,35
2002	126	11	11,45	9	9	1,00	22	4	5,50	161	35	4,60
2003	37	6	6,17	20	18	1,11	2	2	1,00	31	33	0,94
2004	97	9	10,78	29	13	2,23	64	9	7,11	141	29	4,86
2005	206	7	29,43	181	21	8,62	28	2	14,00	425	29	14,66
2006	38	5	7,60	17	22	0,77	24	3	8,00	103	29	3,55
Total	1158	79		444	132		483	48		1354	274	
DFR (medio)			13,33			3,26			8,68			5,07
NDFR			0,4			0,1			0,3			0,2

Tabla VI.1.2.18. DFR en invierno durante el periodo de estudio 1998-2006 en León.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	82	10	8,20	7	7	1,00	48	10	4,80	51	32	1,59
1999	33	6	5,50	27	15	1,80	73	9	8,11	64	29	2,21
2000	268	18	14,89	78	12	6,50	56	6	9,33	30	24	1,25
2001	17	7	2,43	4	15	0,27	2	3	0,67	3	34	0,09
2002	77	11	7,00	2	9	0,22	12	4	3,00	61	35	1,74
2003	26	6	4,33	8	18	0,44	1	2	0,50	17	33	0,52
2004	44	9	4,89	11	13	0,85	34	9	3,78	52	29	1,79
2005	86	7	12,29	68	21	3,24	14	2	7,00	152	29	5,24
2006	20	5	4,00	13	22	0,59	12	3	4,00	62	29	2,14
Total	653	79		218	132		252	48		492	274	
DFR (medio)			7,06			1,66			4,58			1,84
NDFR			0,47			0,11			0,30			0,12

Tabla VI.1.2.19. DFR en invierno durante el periodo de estudio 1998-2006 en Zamora.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	48	10	4,80	10	7	1,43	43	10	4,30	105	32	3,28
1999	39	6	6,50	23	15	1,53	71	9	7,89	145	29	5,00
2000	113	18	6,28	27	12	2,25	30	6	5,00	57	24	2,38
2001	11	7	1,57	6	15	0,40	0	3	0,00	9	34	0,26
2002	38	11	3,45	5	9	0,56	9	4	2,25	92	35	2,63
2003	11	6	1,83	11	18	0,61	1	2	0,50	14	33	0,42
2004	49	9	5,44	16	13	1,23	29	9	3,22	81	29	2,79
2005	73	7	10,43	78	21	3,71	12	2	6,00	190	29	6,55
2006	16	5	3,20	4	22	0,18	9	3	3,00	33	29	1,14
Total	398	79		180	132		204	48		726	274	
DFR (medio)	4,83			1,32			3,57			2,72		
NDFR	0,39			0,11			0,29			0,22		

Tabla VI.1.2.20. DFR invierno durante el periodo de estudio 1998-2006 en Salamanca.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	4	10	0,40	0	7	0,00	3	10	0,30	17	32	0,53
1999	16	6	2,67	2	15	0,13	13	9	1,44	7	29	0,24
2000	23	18	1,28	3	12	1,25	4	6	0,67	5	24	0,21
2001	0	7	0,00	1	15	0,07	0	3	0,00	0	34	0,00
2002	11	11	1	2	9	0,22	1	4	0,25	8	35	0,23
2003	0	6	0,00	1	18	0,06	0	2	0,00	0	33	0,00
2004	4	9	0,44	2	13	0,15	1	9	0,11	8	29	0,28
2005	47	7	6,71	35	21	1,67	2	2	1,00	83	29	2,86
2006	2	5	0,40	0	22	0,00	3	3	1,00	8	29	0,28
Total	107	79		46	132		27	48		136	274	
DFR (medio)	1,43			0,28			0,53			0,51		
NDFR	0,52			0,10			0,19			0,18		

VI.2. Índice de Haines (LASI).

Una vez plasmados los resultados del índice GD en sus facetas cualitativa y cuantitativa parece oportuno analizar el comportamiento de otros índices registrados bibliográficamente. En particular vamos a incidir primeramente sobre el índice de Haines (1988). Dicho índice conocido con el acrónimo LASI (Lower Atmosphere Severity Index) bien expresado en términos de la ecuación VI.2.1.

$$\text{LASI} = \mathbf{A} + \mathbf{B}, \quad (\text{VI.2.1.})$$

en la que **A** y **B** representan los valores de estabilidad y humedad respectivamente. El factor **A** es el asociado a la estabilidad y viene dado a partir de la diferencia de temperaturas en los niveles que definen un estrato. A mayor diferencia de temperaturas mayor **A**, y mayor inestabilidad. El factor **B** representa la humedad en el nivel más bajo del estrato y viene dado a partir del decremento de la temperatura del punto de rocío. A mayor decremento, mayor **B**, y mayor sequedad.

Existen varias modalidades de este índice en cuanto al estrato a considerar, siendo el 850-700 hPa (para altitudes entre 500 y 1500 m) el de uso más generalizado.

La categorización del riesgo según este índice viene dado en la tabla VI.2.1.

Tabla VI.2.1. categorización según LASI

LASI = A + B	Clase de Riesgo
2 ó 3	Muy baja
4	Baja
5	Moderada
6	Alta

Los valores de **A** crecientes se refieren a la evolución estabilidad-inestabilidad y los de **B** a la evolución humedad-sequedad. Por lo tanto, los días con A=3 y B=3 (LASI =6) representarían los días menos estables y muy secos mientras los días de valor A=1 y B=1 (LASI = 2) representarían los días muy estables y muy húmedos.

A pesar de que el aspecto de este índice pudiera parecer similar al índice GD, se esconden muy profundas diferencias. En primer lugar, mientras considerar la estabilidad atmosférica y la humedad como aspectos relevantes al fuego pudiera hacerlos similares, la dimensionalidad del índice de Haines presenta en nuestra opinión ciertas lagunas. Es bien conocido por todos el hecho de que la temperatura del punto de rocío, utilizada para la obtención de **B**, no “liga” estados de evoluciones verticales atmosféricas, ya que su definición se asienta sobre una evolución isobárica. En segundo lugar la temperatura de rocío no es una propiedad másica. En cuanto a la estabilidad (**A**) se refiere, la estabilidad de un estrato queda pobremente representada por la escueta diferencia de temperatura en sus extremos. Para terminar, incluso asumiendo como correctos los parámetros **A** y **B** y su obtención, lo que resulta más disonante con nuestro modelo GD se deriva del hecho de la propia construcción matemática del índice, radicando aquí la esencial diferencia que existe entre los índices de Haines y el GD.

En efecto, la opción matemática de un formalismo aditivo de números naturales conlleva implícitamente la conmutatividad que dicha operación presenta. En otras palabras, las construcciones $3+2$ y $2+3$ aportan el mismo resultado; no sólo eso, sino que las construcciones $1+4$, $2+3$, $4+1$, y $3+2$ también lo aportan. De esta manera para un valor $LASI = 5$ tendremos muchas posibilidades, posibilidades que Haines identifica, y que nosotros vamos a probar claramente que resultan discordantes en resultados en relación al fuego.

Las diferencias entre ambos modelos que se derivan de todo lo anterior son, como vamos a ver a continuación, de gran importancia, y conducen a resultados muy discordantes. Así por ejemplo en la figura VI.2.1 se representan los valores del parámetro **D** (modelo GD) frente a la temperatura en 850 hPa para diferentes decrementos de rocío (diferentes valores de **B** de Haines).

Figura VI.2.1. Valores de D (modelo GD) en función de T₈₅₀ para los diferentes valores de B (Haines).

Podemos observar que para $T_{850}-T_{D850}=9$ ($B=2$ poco húmedo) y una $T_{850} = 10^{\circ} \text{C}$ el valor de D es ligeramente superior a 10 (dominio húmedo GD), mientras que para $T_{850} = 15^{\circ} \text{C}$ es superior a 12 (seco modelo GD). Idénticos razonamientos podríamos decir para días con $B=3$. En definitiva, la clasificación de dominio seco y húmedo no es coincidente en ambos modelos. Nótese que la discrepancia no es debida a una mera traslación de umbrales. Para diferentes valores de T_{850} y T_{D850} se pueden obtener valores similares de B y en cambio obtener valores de D bien distintos. En cuanto al parámetro de estabilidad (A), se producen discrepancias similares ya que, mientras Haines considera simplemente el incremento de temperaturas, el modelo GD considera el incremento de Potencial de Montgomery, en el que se incluyen no sólo los incrementos de temperatura sino también los de geopotencial y por lo tanto los espesores del estrato. Todo lo anterior se traduce en los resultados que se presentan en la tabla VI.2.2. que sirven de base para la figura VI.2.2.

Tabla VI.2.2 LASI desglosado, Galicia durante 1993-2005.

	Tipo de día según Haines								
Año	Muy bajo A=1 B=1	Muy bajo A=1 B=2	Muy bajo A=2 B=1	bajo A=1 B=3	bajo A=3 B=1	bajo A=2 B=2	Moderado A=2 B=3	Moderado A=3 B=2	Alto A=3 B=3
1993	14.2	28.7	12.7	37.7	153.0	35.2	51.4	2.5	76.1
1994	47.6	60.0	15.2	74.3	0.0	58.0	73.1	43.0	102.3
1995	61.0	61.0	10.2	12.0	0.0	61.9	164.4	79.2	117.0
1996	46.9	54.8	18.6	97.3	0.0	114.2	116.4	116.7	147.6
1997	16.0	9.0	36.4	15.8	16.0	80.9	54.4	37.3	79.9
1998	44.1	64.0	28.3	55.3	0.0	96.4	135.4	102.0	166.8
1999	44.8	73.2	20.9	79.5	23.0	49.6	78.7	82.7	59.6
2000	57.9	131.7	46.8	21.5	18.5	93.1	107.3	31.0	150.3
2001	29.9	29.2	27.0	111.5	43.7	36.2	106.9	44.5	72.6
2002	60.1	42.0	44.4	48.8	0.0	99.2	103.3	79.5	113.5
2003	31.1	7.5	30.5	7.0	0.0	59.4	62.5	105.8	105.5
2004	24.2	42.7	24.2	38.9	7.5	58.7	68.4	1.0	74.2
2005	54.5	85.5	36.7	29.7	0.0	50.2	76.5	0.0	87.5
DFR (promedio)	40.95	53.02	27.06	48.40	20.13	68.69	92.21	55.78	104.07

Los resultados de 2004 y 2005, exclusivos de este trabajo, pueden consultarse detalladamente para cada día en el anexo IX.

Vector en rojo: Gradiente de LASI y por lo tanto del riesgo de fuego

Líneas en Verde: isolíneas de LASI

Figura VI.2.2. Esquema del índice de Haines y Resultados correspondientes al periodo 1993-2005 (verano) en Galicia

En dicha figura se representan en color verde las isolíneas del índice de Haines en el intervalo 2-6. Cada isolínea contiene las diferentes variedades que aportan el respectivo valor de dicha isolínea. En abscisas está representado el parámetro de estabilidad (**A**) y ordenadas lo está el de humedad (**B**). Para cada variedad se representan los respectivos DFR. El gradiente de riesgos, de acuerdo al modelo de Haines debería ser perpendicular a las isolíneas de LASI; pues bien, por ejemplo, situados en la celda (3,1) el gradiente va dirigido según la isolínea y no perpendicular, y así sucesivamente con el resto de celdas.

Lo más relevante es que el registro más bajo de DFR acontece para un LASI = 4 cuando debería hacerlo para LASI = 2. Para LASI = 6 los resultados son correctos, deduciéndose de ello que el índice de Haines tiene un comportamiento correcto si de detectar días de alto riesgo se trata, pero un índice de riesgo debe, en nuestra opinión, ir más lejos de este particular caso. Un índice de riesgo debe en definitiva, explicar por qué unos días hay muchos incendios, por qué otros días hay pocos, y por qué en otros se registra una actividad intermedia. En definitiva, debe explicar correctamente la aparición del fuego en cada día. A nuestro juicio la correcta ordenación del índice de Haines sería según las variedades (y nunca según las clases) que se expresan en la tabla VI.2.3.

Tabla VI.2.3. Correcta ordenación de variedades (A,B) de Haines.

(A,B)	Riesgo según Haines y variedad asociada
A=3, B=3	Alta según Haines. Muy poco estable-seco
A=2, B=3	Moderada según Haines. Poco estable-seco
A=2, B=2	Baja según Haines. Poco estable y poco seco.
A=3, B=2	Moderada según Haines. Muy poco estable-Poco Húmedo
A=1, B=2	Muy baja según Haines. Estable- poco Húmedo
A=1, B=3	Baja según Haines. Estable-seco
A=1, B=1	Muy baja según Haines. Estable-muy húmedo.
A=2, B=1	Muy baja según Haines. Poco estable-muy húmedo.
A=3, B=1	Baja según Haines. Muy poco estable-muy húmedo

El modelo de Haines no posee una característica que en cambio el modelo GD sí posee: *La dependencia del riesgo con la estabilidad es directa en dominio húmedo pero inversa en dominio seco.* Importante en situaciones cruzadas.

VI.3. Índice Canadiense de Fuego FWI (Fire Weather Index).

El índice canadiense es, posiblemente el de mayor difusión internacional. En todas las dependencias de toma de decisiones sobre el fuego se tiene conocimiento de dicho índice. Realmente, el índice canadiense es toda una filosofía sobre incendios forestales iniciada en 1933 por Wright y que se ha ido desarrollando de forma continuada hasta 1987 (Van Wagner). Tal filosofía se asienta sobre los siguientes puntos:

- Definir la estación de fuego
- Determinar las medidas apropiadas de prevención de incendios
- Evaluar la probabilidad de ocurrencia de fuego
- Determinar la respuesta de extinción del fuego y los medios
- Información pública
- Toma de decisiones para las áreas de alto riesgo
- Alta o cancelación de permisos de quema de rastrojos
- Planes y conducción de incendios controlados

De forma operativa el esquema oficial del FWI es el que se presenta en la figura VI.3.1:

Figura VI.3.1. Esquema del FWI.

El FWI está basado en el efecto del contenido de humedad de tres tipos de combustible forestal y del viento en la conducta del fuego. Consta de seis componentes: tres códigos primarios que representan la humedad del combustible (FFMC, DMC y DC, cada uno representa combustibles con diferente velocidad de desecación), dos subíndices intermedios que representan la relación de propagación y consumo de combustible (ISI y BUI) , y un índice final que representa la intensidad del fuego como energía liberada por unidad de longitud en el frente del fuego (FWI).

Los tres códigos de humedad del combustible son:

- FFMC: Código de humedad del combustible fino. (Fine Fuel Moisture Code). Representa el contenido de humedad del combustible fino en el suelo del bosque.
- DMC: Código de Humedad de la hojarasca. (Duff Moisture Code). Representa el contenido de humedad de la hojarasca suelta y materia orgánica.
- DC: Código de sequía. (Drought Code). Representa el contenido de humedad del estrato profundo de material orgánica compactada.

Los 2 índices de comportamiento del fuego son:

- ISI: Índice de Propagación inicial (Initial Spread Index). Es una combinación del viento y del FFMC que representa el grado de propagación, sin la influencia de cantidades de combustible.
- BUI: Índice de Combustión. (Buildup Index). Es el índice de acrecentamiento de fuego. Es una combinación del DMC y DC que representa el total de combustible disponible para la propagación del fuego.

El índice final resultante es el FWI: Índice de tiempo de fuego o índice meteorológico. (Fire Weather Index). Es una combinación del ISI y del BUI que representa la intensidad de propagación del fuego, la energía liberada por unidad de longitud del frente de fuego.

Estos componentes son determinados diariamente mediante lecturas de datos meteorológicos tomados al mediodía de: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación, si existe. El objetivo del FWI es incorporar los efectos de la meteorología en los combustibles forestales y por consiguiente en la conducta del fuego. Como podemos ver las condiciones meteorológicas están incluidas en todos y cada uno de los pasos.

Por medio de estos códigos, el sistema canadiense, evalúa el contenido de humedad y la conducta relativa de fuego utilizando el efecto del tiempo pasado (*Past Weather*) y el tiempo presente (*Present Weather*) en los combustibles situados a nivel del suelo.

Tanto los códigos e índices intermedios (FFMC, DMC, DC, ISI, BUI) como el índice final (FWI) están baremados con parametrizaciones generalmente de base estadística. La forma básica es un conjunto de ecuaciones empíricas (Van Wagner and Pickett 1985) cuyas entradas son las variables meteorológicas y la salida los diferentes componentes (códigos e índices). Estas ecuaciones pueden ser procesadas por ordenador. Pero además para desarrollar el procedimiento pueden utilizarse nueve tablas publicadas con anterioridad (Canadian Forestry Service 1984). Cada componente resultante tiene su propia escala relativa de valores, y aunque las escalas para las seis componentes son diferentes, todas están estructuradas para que los valores altos indiquen más riesgo de ignición.

En función del resultado del índice final FWI pueden definirse varias clases de peligro. Existen varias divisiones a adoptar en 4, 5 o 6 clases. Una de las formas más sencillas de división en clases que se puede adoptar es en 4 grandes clases como las que se muestran en la tabla VI.3.1:

Tabla VI.3.1 Clases de peligro según FWI.

Clase	Riesgo	Valor FWI
A	Bajo	0-7
B	Medio	8-16
C	Alto	17-31
D	Extremo	32+

Antes de adentrarnos en los resultados operativos que puede dar el FWI, conviene discutir la filosofía inicial y la conveniencia de las magnitudes que incluye. Entre las magnitudes *input* destaca la humedad relativa que como bien se sabe no es precisamente el mejor índice de humedad del aire. En segundo lugar incluye el viento refiriéndose, en general, al viento sinóptico, en caso de que no esté aconteciendo el incendio, o a la resultante de la interacción de tal viento con el generado por el propio incendio. Curiosamente no consideran la dirección del viento sino simplemente su módulo. En nuestra opinión es más interesante conocer la dirección que el módulo, ya que la dirección indica la procedencia de la masa atmosférica, e interpretado esto en sentido opuesto, dada una dirección podemos intuir las características de una masa que llega a un lugar. Aún siendo llamativo el hecho de que no demos importancia al módulo de la velocidad del viento, ello aporta simplificación al problema ya que, en definitiva, tal módulo de la velocidad del viento va a depender de la estabilidad del lugar. Viene a corroborar nuestra anterior afirmación el hecho de que la mayoría de los incendios acontecen en días de viento sinóptico débil. El posterior viento del incendio, el asociado a la convergencia, sí suele ser apreciable. En tercer lugar se incluye también la temperatura superficial como *input*, y también es conocida nuestra opinión a cerca de este escueto parámetro como indicador del riesgo de fuego, según lo estudiado en esta tesis.

Pero lo más llamativo sin duda del FWI es que ignora el papel que juega la estabilidad atmosférica del lugar. En otras palabras el FWI ignora que el fuego es esencialmente una dinámica vertical.

Todas las consideraciones anteriores inducen a pensar que dicho índice describe bien las componentes vegetal y de suelo pero, bien al contrario, presenta profundas lagunas en el papel que juega la atmósfera en relación al fuego. Esta descompensación entre la minuciosidad presentada en los aspectos de suelo y combustible en relación a la atmósfera hace pensar que en la elaboración de este índice no participaron estudiosos de la atmósfera.

La sobredimensión que adquiere el estado de la vegetación en relación al fuego para este índice (y otros similares) conlleva profundos errores. Es tal el peso de las condiciones meteorológicas en el problema, que muchos días con estados de vegetación

poco oportunos al fuego pueden acontecer incendios por existir óptimas condiciones meteorológicas. Pero, además, hay que tener claro que la atmósfera puede cambiar drásticamente en unas pocas horas y ello, evidentemente, no es así para el suelo. La extraordinaria inercia que tiene el suelo hace que en plenas oleadas, por irrupción de condiciones meteorológicas de fuego, el índice FWI presente valores de riesgo bajos. Como ejemplo en la figura VI.3.2. presentamos el mapa de valores de FWI en pleno centro de la conocida oleada de incendios de agosto de 1998 en Galicia.

Figura VI.3.2. FWI el 10 de agosto de 1998 en la Península Ibérica. Fuente: <http://natural-hazards.jrc.it/fires/>

Como podemos ver ese día en Galicia el riesgo es nulo o bajo según el índice canadiense y sin embargo en Galicia se registraron ese día 221 incendios. El modelo GD definió ese día como de máximo riesgo de incendios clasificándolo como tipo I.

Los motivos de que el sistema no indique correctamente el riesgo en una zona también puede ser debido a la propia construcción aditiva del FWI, tal y como le sucedía al LASI. El FWI combina de forma aditiva muchos efectos, el mismo valor del índice FWI

puede obtenerse por medio de combinaciones muy diferentes de los tres componentes primarios del contenido de humedad del combustible así como del viento.

Alguno de los 3 códigos de humedad puede ser relativamente alto o bajo en oposición a los otros dos y resultar el mismo FWI, por ejemplo, dos o tres días secos después de grandes lluvias producen un FFMC alto, mientras que el DMC tiende a ser relativamente bajo. Otro caso es un tiempo húmedo o lluvia ligera después de un largo periodo seco que producirá una bajo FFMC mientras el DMC tiende a ser más alto. Un tercer ejemplo es que el DC puede aumentar o caer gradualmente mientras los otros dos códigos fluctúan. Vemos como situaciones muy diferentes pueden dar el mismo valor del FWI.

El factor del viento juega un papel crucial y así, por ejemplo, un repentino día seco y con viento causará un dramático FWI elevado. Tal es su influencia en el resultado final que el FWI puede ser muy variable de un día a otro.

La solución adoptada por los usuarios de este sistema es que si se quiere tener una información completa sobre la situación de peligro de fuego, no sirve con dar un único valor numérico aislado del FWI, y que todos los componentes del sistema son necesarios. La adopción de esta maniobra desde un punto de vista operativo dice mucho de la poca confianza que ofrece el FWI en sí mismo.

La aportación del resto de códigos amplía la información respecto al riesgo de fuego. De esa manera, por ejemplo, una posible situación que podemos encontrarnos es un FFMC de 86 que indica que el combustible fino arderá con facilidad, un DMC de 25 significa que el fuego puede afectar al combustible ligero y al estrato de hojarasca y un DC de 120 quiere decir que el estrato profundo así como el combustible de mayor volumen no serán afectados por el fuego. Otro caso sería un FFMC de 94 con lo cual el combustible fino arderá con extrema facilidad, un DMC de 45 queriendo significar que los estratos de hojarasca se verán afectados, y un DC de 320 que nos dice que los estratos en profundidad pueden verse afectados así como el combustible voluminoso. Un día con esta situación indicaría un FWI propio de una conducta extrema del fuego.

Por otro lado los 2 índices de comportamiento del fuego indican la posibilidad de propagación inicial, combustible disponible y el índice final la intensidad del fuego. Una posible situación sería tener un ISI de 5 que reflejaría una baja propagación inicial, un BUI de 120 significando un alto volumen de combustible disponible en la combustión y un FWI de 21 que refleja una intensidad de fuego potencialmente alta. Por otro lado si el ISI es de 25 la velocidad de propagación inicial es extrema, un BUI de 10 indica un bajo volumen de combustible disponible y un FWI de 21 como ya dijimos una intensidad alta de fuego. Diferentes comportamientos del fuego y, por lo tanto, valores de ISI y BUI han dado lugar a un valor semejante de FWI.

Además de los aspectos comentados anteriormente existen otros que debilitan la capacidad de este sistema en su aplicación. El sistema Canadiense está concebido en una base empírica en los bosques de Canadá y su aplicación en otras latitudes, con otros tipos de combustible, y con más de una estación de fuego, se encuentra limitada. No es un sistema universal que garantice buenos resultados en localizaciones que no sean las de Canadá. No obstante podría adaptarse a otras latitudes y combustibles pero seguiría poseyendo las carencias de la filosofía inicial.

Además de todo lo dicho añadiremos que todo sistema de detección del riesgo de fuego debe caracterizarse por su sencillez, pero el FWI, por un afán en incluir todas las variables del estado de la vegetación y suelo que entran en juego, ha caído en un excesivo barroquismo que dificulta la operatividad y omite las verdaderas condiciones ambientales favorecedoras del fuego.

En su sentido más simplificado, esto es, valorando escuetamente los cuatro niveles de riesgo, hemos procedido a calcular dicho índice para nuestra zona de estudio (Galicia) en el periodo 1998-2004 (periodo estival), y en la tabla VI.3.2. se presentan los valores medios diarios de incendios (DFR) que, como se puede ver presenta una ordenación correcta en promedio.

Diariamente los seis componentes resultantes de la aplicación del sistema FWI así como el riesgo asociado pueden ser consultados en el anexo X.

Tabla VI.3.2. DFRs anuales para Galicia en el periodo 1998-2004

	extremo	alto	medio	bajo
DFR98	161,71	81,50	36,60	8,00
DFR99	79,87	67,50	56,81	14,74
DFR00	160,33	120,55	96,67	35,13
DFR01	140,47	70,19	45,46	12,95
DFR02	134,47	102,25	61,26	13,32
DFR03	103,12	85,00	41,80	13,21
DFR04	87,00	65,29	39,42	13,10
MEDIA	123,85	84,61	54,00	15,78
NDFR	0,44	0,30	0,19	0,06
NDFR (1 dec)	0,4	0,3	0,2	0,1

Pero téngase en cuenta que para la obtención de esos valores FWI hemos procedido a determinadas subrutinas que incluyen factores tan diversos como las coordenadas del lugar, tipo de suelo, y tipo de vegetación, procesos todos ellos sumamente complejos, y que daría la sensación de que el FWI sólo puede ser operativo a partir de una base de datos muy amplia.

Siendo los resultados, en cuanto a valores medios se refiere, correctos con la ordenación de riesgos, es sorprendente como encajan las categorías del riesgo FWI en el diagrama “box” del modelo GD. En tal sentido en la tabla VI.3.3. se muestran los porcentajes en cada tipo GD de aquellos días tipificados según FWI.

Tabla VI.3.3. Porcentaje de días de cada tipo GD en cada tipo de FWI. La Coruña 1998-2004

	extremo	Alto	medio	bajo
% de ser tipo I	58,60	21,37	3,42	2,09
% de ser tipo III	40,13	41,98	16,24	5,44
% de ser tipo IV	1,27	29,01	76,07	73,64
% de ser tipo II	0,00	7,63	4,27	18,83

En la figura VI.3.3. se presentan puntualmente las diadas (e, D) de aquellos días tipificados con FWI extremo.

Figura VI.3.3. Diada (e,D) para FWI Extremos.

La simple visualización indica que tales días vienen a caer de pleno en el dominio seco (GD); Para el caso de FWI alto podemos observar que el reparto ya presenta una mayor homogeneidad entre los cuatro tipos GD, homogeneidad que se rompe hacia el dominio húmedo para el caso de FWI medio, y aparece una localización casi generalizada en el dominio húmedo para los días de FWI bajo (ver figuras VI.3.4, VI.3.5, VI.3.6).

Figura VI.3.4. Diada (e,D) para FWI Altos.

Figura VI.3.5. Diada (e,D) para FWI Medios.

Figura VI.3.6. Diada (e,D) para FWI bajos.

La conclusión es clara: El modelo canadiense, con el barroquismo de cálculo mencionado no sorprende en resultados al esquema GD (que sólo usa dos parámetros de índole meteorológica). En sentido opuesto habría que razonar que las condiciones de suelo, vegetación, etc, tienen que estar estrechamente vinculadas a la estructura atmosférica, ya que si no fuera así la identificación de las figuras, mencionada anteriormente, no hubiera podido ser observada.

Para completar esta discusión podemos plantearnos cual es el coste conceptual de no incluir la estabilidad por parte del modelo canadiense. Para ello retornamos a la simple visualización de las figuras VI.3.3 a VI.3.6. En la primera de ellas podemos ver que el FWI identifica en riesgo los tipos I y III del modelo GD, que como sabemos, no presentan igual frecuencia de incendios por diferente estabilidad. Para los riesgos intermedios (alto y medio) la identificación es si cabe más generalizada, especialmente en aquel (alto), y ello choca frontalmente con la diáfana clasificación de riesgos del modelo GD. En cuanto al riesgo bajo de FWI, viene a identificar los días IV y II que el modelo GD categoriza con diferente valor. En definitiva todo ello se deriva del hecho de que el FWI, desde el punto de vista meteorológico, sólo discierne los dominios húmedo y seco.

Los resultados globales del FWI son en apariencia buenos debido a que en la clase extrema y baja funciona bastante bien. El problema viene en los días de clase alta y media donde el riesgo no queda bien identificado por el FWI.

Por último, en la figura VI.3.7. se exponen los resultados globales de Galicia (1998-2004) para valores medios (DFR) en relación a la actividad media de fuego, para ambos modelos. Aparentemente los resultados no son muy diferentes pero llaman la atención algunos aspectos como que la gráfica de los valores GD presenta el corte con la actividad media justo en el punto medio entre las clases III y IV (donde debe estar), apareciendo más cerca del nivel medio en el caso de FWI; a su vez, la simetría entre los diversos niveles de riesgo aparece mejor definida en el modelo GD (la simetría entre los tipos III y IV del modelo GD es más rigurosa que la de los altos y medios del FWI, como también lo es la que hay entre los I-II de GD y el extremo-bajo de FWI).

Figura VI.3.7. DFR medios: modelo GD y sistema FWI.

VI.4. Otros Índices de riesgo

A) Índice Americano.

Cuando el FWI se fue desarrollando apareció en USA el esbozo de lo que hoy se conoce como Índice Americano (National Fire Danger Rate, NFDR), plenamente desarrollado por (Deeming et al 1977). Se trata de un índice relativamente isomorfo al FWI. El Índice Americano, junto con el canadiense, es uno de los índices más utilizados en los estamentos de lucha antifuego, por ejemplo, es incluido en el Sistema de Alerta de Peligro de Incendios de la Unión Europea.

Dentro del NFDR se definen tres índices diarios y un índice de severidad estacional. Los índices diarios son: Occurrence Index (OI), Burning Index (BI) y Load Index (LI). El primero de ellos representa la facilidad con la que el combustible fino muerto pueda prender y aparece modulado por un factor subjetivo de riesgo. El segundo indica la rapidez de avance, anchura y tasa de combustión por unidad de superficie del frente del fuego. Está referido según la velocidad del viento, la estimación de la pendiente, la humedad de los combustibles finos muertos y vivos, la humedad de los combustibles medios y gruesos muertos y vivos, y según el modelo de combustible. El tercero de ellos viene a representar el grado de dificultad que va a conllevar la contención del fuego sobre una zona, se trata por tanto, de una componente de gestión.

El Índice de severidad estacional (*Seasonal severity Index*) es el resultado final del procedimiento. Es un sumatorio de los índices LI de todos los días que componen la estación de fuego. Es un indicador del trabajo total que se requerirá para el control de todos los incendios en una temporada.

Las observaciones meteorológicas básicas necesarias para la determinación de la humedad del combustible y los componentes del NFDR son la velocidad del viento, la temperatura, la nubosidad, la humedad relativa y la precipitación.

El *input* meteorológico que requiere el NFDR es muy similar al del FWI y, en todo caso, algunos de los parámetros son los registrados en las horas centrales del día, minimizando en consecuencia el carácter predictivo del índice. En otro sentido, también

hay que señalar aquí las deficiencias conceptuales que conlleva el uso de algunos parámetros (humedad relativa, etc).

De la mano del NFDR aparece el conocido sistema BEHAVE (Rothermel y Burgan 1984) que utiliza como entrada los modelos de combustible, la humedad de combustibles, la velocidad y dirección del viento y la pendiente. El BEHAVE es un índice que se refiere a la propagación, y por lo tanto al *modus operandi* frente a un determinado incendio ya iniciado. El BEHAVE, en contra de lo que muchos piensan no es un índice de riesgo sino un índice orientador del desarrollo de un incendio ya iniciado.

En definitiva el NFDR viene a presentar resultados estadísticos similares a los del FWI, detectando bien los días de alto riesgo pero escondiendo en esa bondad de resultados globales serias contradicciones; contradicciones que, a nuestro juicio, se derivan de la estructura física del modelo.

B) Índice Australiano

En Australia se ha desarrollado el FFDM (Forest Fire Danger Meter) entre 1967 y 1996 siendo, McArthur, (1967, 1996) uno de los investigadores más relevantes en la construcción del índice. McArthur se fundamentó en una base de datos experimentales.

También, a semejanza de los anteriores resulta un índice complejo, denominado Índice de Peligro, que como resultado final presenta una categorización de 0 a 100 según se expone en la tabla VI.4.1.

Tabla VI.4.1. FFDM: Niveles de riesgo.

Clase	Valor del índice de Peligro
Bajo	0-4
Moderado	5-11
Alto	12-23
Muy Alto	24-49
Extremo	50-100

El *input* comprende: temperatura máxima, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, estabilidad atmosférica, sequía previa, y cantidad de combustible. Mediante una serie de tablas de origen estadístico-empírico se obtienen los índices y factores intermedios que darán lugar al Índice de Peligro final. No vamos a volver a entrar aquí a matizar cual es nuestra postura a cerca de las deficiencias en el uso de parámetros superficiales (como la humedad relativa, etc) en la definición del riesgo de fuego, suficientemente plasmada a lo largo de esta tesis.

El carácter empírico del sistema limita su aplicación no siendo un método universal. Además, en todo caso las variables de entrada son los valores registrados entre las 13:00 y las 16:00 h. (hora local) lo que hace que el valor predictivo del índice australiano está temporalmente muy limitado.

El aspecto más novedoso, especialmente en el contexto de esta tesis, es que el modelo australiano incorpora la estabilidad como un parámetro incidente al fuego, lo que ellos llaman la “tercera dimensión” del fuego. Como resulta evidente, estamos de acuerdo con dicha consideración. Sin embargo, para el FFDM la estabilidad atmosférica es un parámetro a deducir subjetivamente a partir del análisis sinóptico; ello puede ser correcto en términos globales, pero requiere de una gran experiencia para trasvasar el concepto de estabilidad sinóptica a estabilidad mesoescalar. La primera está referida a la presencia de borrascas, advecciones diferenciales, etc. La segunda se deriva del análisis de radiosondeo. Insistimos, ambas están conectadas, sin duda, pero requieren de un profundo conocimiento de la zona y, más concretamente, de la respuesta que en la zona presenta el análisis sinóptico.

En muchos trabajos de la bibliografía australiana se relata la situación del día 7 de enero de 1994, situación de extraordinaria actividad de fuego en la costa E australiana. Para ese día el FFDM presentó un comportamiento absolutamente correcto cuando, rutinariamente, fue evaluado para las horas centrales de ese día, esto es, cuando los incendios seguramente estaban empezando a registrarse. Pues bien, para ese día los valores de la diada (**e**, **D**) del modelo GD y los potenciales correspondientes son los que se presentan en la tabla VI.4.2.

Tabla VI.4.2. Modelo GD valores : 7 –1- 1994. Unidades en kJ/kg.

TIPO	e	D	S ₈₅₀	S ₇₀₀	h ₈₅₀	h* ₈₅₀
I	2	29	309	312	319	349

Los datos usados corresponden a la estación Williamtown Amo Raaf. Conviene recordar que el modelo GD se evalúa a las 00:00 h.

Su parecido con el modelo canadiense nos señala que, seguramente como en aquel, los resultados puedan ser buenos en las clases de mayor y menor riesgo (dominio seco y húmedo respectivamente), pero no distingue bien el riesgo entre las clases intermedias. Pero el tener en cuenta la estabilidad de forma implícita en el análisis, le hace más eficaz que el canadiense para detectar el doble sentido que puede adquirir el riesgo dependiendo de si nos encontramos en dominio seco o húmedo. No obstante, alguna de las situaciones ante las que se ha encontrado el sistema australiano, durante su aplicación rutinaria, es la falsa alarma. Ésta sucede los días en los que se declara un día de máximo riesgo (inestable con baja humedad en los combustibles) y sin embargo irrumpen condiciones atmosféricas de elevada humedad, y no tienen lugar incendios.

C) Índice Italiano

El servicio forestal italiano ha desarrollado un índice que presenta carácter dual: Índice de Inicio (II) e Índice de Propagación (IP).

El primero de ellos (II) contempla la temperatura máxima diaria, precipitación y número de días sin precipitación previa. Es similar el del Índice Americano. Tal índice presenta carácter acumulativo, esto es, se asocia al valor del día anterior mediante la adicción de un factor dependiente de la temperatura máxima. Previamente, para el caso que la precipitación se registre en el día presente, existe un mecanismo de reducción del índice del día anterior restando la precipitación eficaz. La escala del índice de Inicio va de 0 a 200 y así se definen 6 clases como las descritas en la tabla VI.4.3.:

Tabla VI.4.3. Clases del índice de inicio (II)

Valor del Índice de Inicio	Clase	Interpretación
0-25	Bajo	Inicio muy difícil
25-50	Medio	Puede arder solo el combustible fino muerto
50-100	Alto	La vegetación anual arde completamente
100-125	Muy Alto	El combustible grueso muerto arde y el foco es difícil de extinguir
125-150	Altísimo	La humedad del combustible vivo desciende y puede arder con facilidad
150-200	Extremo	El frente de llama avanza rápidamente afectando a todos los combustibles

El Índice de Propagación (IP) es representativo de las condiciones de desarrollo y avance del frente de fuego una vez iniciado el incendio. Es similar al del Índice australiano. Para el cálculo del IP se necesitan datos diarios de precipitación, temperatura media diaria, humedad relativa y velocidad del viento. Previamente es necesario el cálculo de un índice intermedio de aridez (FA) dependiente del valor del II, del número de días transcurridos desde la última precipitación y de la precipitación en las últimas 24 horas. Una vez sabido FA con los valores de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento se obtiene IP. El valor va de 0 a 100 definiendo 5 niveles de riesgo (ver tabla VI.4.4).

Tabla VI.4.4. Niveles de riesgo para cada valor de IP.

Valor del IP	Nivel de riesgo
1-5	Bajo
5-12	Moderado
12-24	Alto
24-50	Muy alto
50-100	Extremo

Disponiendo de información meteorológica se puede definir el riesgo de incendios por medio del valor de II y de IP. Una versión para la obtención de estos índices fue publicada por Ventura et al. (2001).

El índice italiano es uno de los índices utilizados en el ámbito de la Red Europea de Protección Civil de la Unión Europea. Los medios de gestión de la administración lo que necesitan es un índice numérico de rápida obtención para agilizar la toma de decisiones, y éste cumple muy bien sus expectativas al respecto, ya que es muy fácil de obtener a partir de datos meteorológicos en superficie. Pero se trata de un índice sin significado físico, basado en una metodología empírica, además de que utiliza parámetros de entrada, a nuestro juicio, con deficiencias conceptuales. Por lo tanto, al igual que lo observado en otros índices de carácter empírico ofrece ciertas limitaciones.

D) Índice Francés

Desde los años 70 hasta los años 90 del siglo XX se desarrolló un sistema de establecimiento del riesgo de fuego centrado fundamentalmente en el sur del país galo, basado en las aportaciones de diversos autores como Orioux (1979) o Cárrega (1987, 1988, 1989, 1991a, 1991b).

Orioux define cuatro niveles de alerta como los mostrados en la tabla VI.4.5.

Tabla VI.4.5. Niveles alerta según Orioux

Índice	Peligro	Alerta
0	Bajo	NO
1	Moderado	Sencilla
2	severo	Grave
3	Muy severo	Muy grave

Para definir el Nivel de Alerta, Orioux parte de que los dos parámetros fundamentales influyentes en la aparición de los incendios forestales son: la sequedad y del viento. El primero de los parámetros se mide por medio del déficit de agua en el suelo que es la

saturación del suelo (150 mm) menos la reserva existente dependiente de la evapotranspiración potencial (ETP). Los diferentes niveles de sequedad son: nula (150 mm), poco fuerte (100 mm), fuerte (50 mm) y muy fuerte (30 mm). El parámetro referido al viento es la velocidad del viento. Para la obtención de los valores de entrada básicos al sistema (temperatura para el cálculo de la ETP, módulo del viento, etc) se utiliza la red de estaciones del servicio meteorológico. A partir de la combinación de los dos parámetros se definen las alertas de fuego según los umbrales fijados en la tabla VI.4.6.

Tabla VI.4.6 Combinación de los efectos del viento y de la sequedad.

Sequía	Viento		
	< 20 km/h	20-40 km/h	> 40 km/h
Nula	0	0	0
Bastante fuerte	1	1	2
fuerte	1	2	3
Muy fuerte	1	2	3

A lo largo de este trabajo es bien conocida nuestra postura a cerca de la introducción de la temperatura en los sistemas de detección del riesgo. Lo mismo podemos decir del módulo del viento medido localmente, debido a la dependencia que éste puede tener por la presencia o no de un foco de fuego en la zona.

Un aspecto novedoso es que en este sistema se considera la dirección del viento sinóptico desde un punto de vista cualitativo en la definición del riesgo de fuego. Consideran que el máximo riesgo de fuego se sitúa ante vientos de tipo terral, los vientos de origen marino procedentes del Mediterráneo en cambio son más húmedos y el peligro es menor. Un análisis del viento sinóptico puede no aportar mucha información sobre la velocidad del viento pero sí aporta información sobre las características de las masas que llegan a la zona, cosa que la dirección del viento

medido a escala local no siempre es capaz de detectar. En el sur de Francia habría que poner especial atención en aquellas situaciones que den lugar a vientos sinópticos de componente Norte (Mistral).

Pero hasta lo visto se encuentra ausente el efecto de la humedad atmosférica. Sucesivas aproximaciones posteriores de carácter empírico al Índice Francés introdujeron el efecto de la humedad atmosférica mediante la evaluación de la humedad relativa, un coeficiente de sensibilidad de la vegetación, un coeficiente estacional y la llamada reserva superficial (Cárrega, 1987, 1988, 1989, 1991a, 1991b). En todo caso se mantienen las variables de entrada iniciales de temperatura (para calcular la ETP y la reserva de agua en el suelo) y la velocidad del viento. Ya es conocida nuestra opinión en esta tesis respecto de la conveniencia del uso de la humedad relativa como parámetro de humedad atmosférica, muy común en este tipo de índices.

Las aproximaciones de Cárrega se materializan en expresiones empíricas que incluyen tres factores fundamentales: factor de humedad, factor del viento y factor de la reserva de agua.

El resultado de las expresiones empíricas se encuentra baremado en una escala en función del riesgo. En la tabla VI.4.7. se indica la clasificación del riesgo según una de estas aproximaciones denominada Índice de Cárrega.

Tabla VI.4.7. Clasificación del riesgo según el Índice de Carrega.

Índice	Riesgo
> 450	NULO
450>índice>300	BAJO
300>índice>150	MODERADO
150>índice>50	SEVERO
50>	MUY SEVERO

Otras aproximaciones también de carácter empírico incluyen el efecto de la presencia o no de precipitación en los días precedentes y el valor de la última precipitación, junto con las variables iniciales de temperatura (ETP y reserva de agua) y velocidad del

viento. En estos casos el resultado indica un valor cuya escala señala la probabilidad de riesgo de fuego.

En estas últimas expresiones las condiciones de sequedad de los días intermedios no son considerados. Los resultados del riesgo obtenidos serán los mismos siendo los días desde la última precipitación secos o siendo húmedos. Las condiciones de humedad existentes en el suelo, y por lo tanto el riesgo de fuego, no pueden ser las mismas después de una situación meteorológica previa húmeda que seca. No se entra a valorar las condiciones de los días transcurridos. A nuestro juicio esto puede conllevar un error en la definición del riesgo.

Para terminar, en cualquiera de las aproximaciones empíricas la construcción de las expresiones no responde a ninguna lógica desde un punto de vista físico, y simplemente se limitan a relacionar los diferentes factores mediante coeficientes obtenidos de ensayos reales. Además, como toda metodología empírica el Índice Francés posee una serie de limitaciones en su aplicación, por ejemplo, las ecuaciones sólo pueden ser utilizadas en las regiones para las cuales fueron definidas y el trasladar su uso a otras zonas requeriría una adaptación.

E) Índice Español (ICONA)

Las autoridades españolas desde los años 50 a los años 80 del siglo XX desarrollaron un método para la detección del peligro de incendio partiendo de la base de los métodos ya existentes canadiense, australiano y americano. Fruto de la combinación de todos los índices se estableció definitivamente en 1993 un sistema de naturaleza empírica (Vélez, 1982, 1988, 2000) que consta de: Un índice de Probabilidad de Ignición y un Índice de Alerta que incluye el efecto del viento.

La obtención del índice de Probabilidad de Ignición requiere como datos de entrada: el sombreado, la temperatura, humedad relativa, mes del año, orientación y pendiente. Para el Índice de Alerta el sistema tiene en cuenta la Probabilidad de Ignición, la velocidad del viento y la dirección del viento exclusivamente en áreas de costa, diferenciando entre vientos terrales y vientos no terrales. Todos los datos de entrada son tomados a las 12:00 horas.

Son definidos diferentes niveles de Alerta: El nivel de prealerta conlleva un peligro bajo o moderado en el que no se toman precauciones especiales. Después están los niveles de alerta, alarma y el de alarma extrema. Bajo esta última la probabilidad de muchos y grandes incendios es muy alta.

Este sistema puede tener capacidad predictiva. A partir de datos previstos a mediodía puede predecirse la Probabilidad de Ignición. Luego siempre que exista una buena predicción de temperatura, humedad relativa y dirección del viento podemos obtener mediante este sistema la Probabilidad de Ignición que existirá en una zona determinada. Pero por su carácter empírico adolece de las mismas limitaciones que otros índices estudiados aquí.

Además, al igual que otros índices, la humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, son variables meteorológicas de entrada en este sistema, cuya escasa idoneidad a nuestro juicio como parámetros *input* en los sistemas de detección del riesgo, ha sido suficientemente plasmada a lo largo de este trabajo. Por otro lado, la dirección del viento, medida localmente, puede no tener mucha trascendencia porque puede estar influida por la topografía o por la presencia de un foco de un incendio, sin embargo es introducida como tal en el sistema. Es más conveniente una evaluación del viento a escala sinóptica. El sistema reconoce la importancia de la información sobre la procedencia de las masas de aire, y el viento a escala sinóptica es el que puede aportarnos tal información.

Autores como Vélez (1988), al hablar del Índice Español, reconoce en publicaciones del ICONA que *“la aparición del fuego requiere de unas condiciones meteorológicas propicias”*, pero a nuestro juicio es importante definir cuáles son exactamente esas condiciones y a qué escala meteorológica pertenecen, algo que éste índice, como muchos otros vistos aquí, no han logrado definir de forma correcta desde un punto de vista físico.

F) Índices de Teledetección

La teledetección, a los efectos que nos ocupa en este trabajo, es una técnica derivada del análisis radiométrico llevado a cabo por los satélites. La herramienta útil más conocida es el denominado Índice de Vegetación que consiste en la reflectancia diferencial que sobre un píxel de superficie vegetal se produce. La actividad vegetativa o Índice de Vegetación viene expresado por:

$$IV = IR - R, \quad (VI.4.1)$$

en la que el minuendo es la reflectancia en la banda del infrarojo próximo (proporcional a la actividad vegetal) y el sustraendo es la reflectancia en una longitud de onda mayor (rojo), que representa la vegetación muerta o carente de actividad por enfermedad.

Un valor normalizado (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) del anterior viene dado por:

$$NDVI = \frac{(IR - R)}{(IR + R)} \quad (VI.4.2)$$

Tal índice cobra sentido en cuanto al riesgo de incendios cuando es usado para una evolución temporal del pasado al presente. Al disminuir con el tiempo la actividad vegetativa (NDVI disminuye), según algunos autores, existe más combustible seco susceptible de ser quemado. Pero esta consideración temporal pone en duda la capacidad predictiva del modelo desde un punto de vista operativo.

Uno de los índices que son calculados utilizando como base el NDVI es el Decremento Relativo del NDVI (DRN), y es utilizado como índice de riesgo de fuego. El DRN se basa en la comparación del total de píxeles de dos imágenes de NDVI de dos fechas diferentes, que normalmente son de intervalos regulares de un día.

También puede calcular el Índice de Verdor Relativo que es evaluar para cada píxel de una imagen NDVI las posibilidades de arder en una escala de 0 a 100 en función del máximo valor de NDVI posible. Es un índice de riesgo de fuego utilizado en USA. Según éste Índice: *“cuanto mayor sea el índice de verdor mayor será el riesgo de que se produzcan incendios”*.

Dentro de la Unión Europea han tenido en cuenta este tipo de índices de riesgo de fuego obtenidos mediante teledetección junto con otros también estudiados aquí como el canadiense, Francés, Italiano y Español.

En nuestra opinión, aún admitiendo que son absolutamente correctos los planteamientos iniciales de este sistema, pensamos que el problema de la ocurrencia del fuego conlleva otros aspectos alejados del planteamiento de este índice (características del aire seco, estabilidad, etc). Además, en el mejor de los casos, este índice reproduciría la catalogación de riesgos del FWI ya que ambos, de formas distintas (NDVI a más humedad más actividad vegetativa y FWI a más humedad más contenido de agua en los combustibles), en definitiva consideran la humedad como principal parámetro. Las críticas que en su momento hicimos del FWI podrían ser, consecuentemente, reproducidas aquí.

En la figura VI.4.1. se presenta el mapa de índice de verdor medio de la superficie de Galicia en la tercera decena del mes de agosto de 1998. El color verde representa los índices de verdor más bajos y menor riesgo de fuego y el color rojo los índices de verdor más altos y mayor riesgo de fuego.

Figura VI.4.1. Índice de verdor medio en la tercera decena del mes de agosto de 1998 en Galicia. Fuente: Laboratorio de teledetección Universidad de Valladolid

WWW.latuv.uva.es

Tal figura fue construida con valores medios diarios. Si consideramos que los números de incendios registrados en tal decena son los que se presentan en la figura VI.4.2 podemos deducir de ésta que hubo una gran variabilidad de valores en los números de eventos, con lo que no estaría nada claro si la figura de Índice de Verdor medio presentada corresponde a la fase aguda de fuego (21-25) o a la fase baja (27-28). En otro orden de cosas, la provincia de Pontevedra es la que más bajo valor de Índice de Verdor presenta y curiosamente es la que mayor número de incendios registra (incluso proporcionalmente).

Figura VI.4.2 Número de incendios ultima decena de agosto de 1998 en las provincias de Galicia

En lo que no hay duda es en el hecho de que la técnica satelitaria es útil y precisa en la determinación de áreas quemadas a posteriori. Algunos autores como Vélez (2000), Al-Rawi et al (2002) confían en la utilidad de estas técnicas de teledetección para monitorizar los incendios.

Por otro lado, la teledetección mediante el NDVI aporta una información verdaderamente interesante, con la posibilidad de realizar representaciones cartográficas útiles en labores de gestión de las masas forestales, ya que muestran el estado de la vegetación casi a tiempo real desde el punto de vista productivo. Éste parámetro se correlaciona bastante bien con parámetros de productividad vegetal.

Pero el NDVI no es un buen método para analizar el futuro estado de la vegetación favorable al fuego, debido a 3 razones fundamentalmente:

1- Los ritmos de producción vegetativa pueden ser muy variables de plantas vivaces a anuales, y de perennes a caducas, a lo largo del año, y ello influir en el NDVI pasado y presente, y por lo tanto, en la definición de un riesgo erróneo de fuego. Por ejemplo en invierno, la vegetación vivaz caducifolia es interpretada con un índice de verdor óptimo para el fuego cuando puede contener una humedad lo suficientemente alta como para inhibir su aparición.

2- Otro inconveniente del NDVI es que detecta el estado de la vegetación del pasado y presente. No tiene capacidad de realizar una proyección futura. Los índices de riesgo de fuego que usan el NDVI necesitan medidas a posteriori y no poseen carácter predictivo.

3- Por medio del NDVI puede detectarse un cambio en la actividad vegetativa de un día para otro pero por lo general suele ser en intervalos temporales mayores. El estado de la vegetación no suele cambiar en 24 horas de una forma drástica y por ello para estudiar la variación del NDVI necesitas evaluar un periodo de varios días. Ese tiempo de respuesta de la producción vegetal a cambios ambientales es más largo que la escala temporal en la que aparece el fuego en la naturaleza, que es a una escala diaria. Por lo tanto, la medida de la actividad productiva de las plantas mediante el NDVI no parece la forma más adecuada de detectar el ritmo de ocurrencia de fuego en las oleadas que los datos nos muestran.

VI.5. Índices complementarios

En esta sección vamos a tratar algunos índices que no son específicamente diseñados para el problema del fuego, pero que algunos autores insisten en que pueden tener una validez complementaria de interés. Son índices diseñados generalmente para la predicción del desarrollo cumular local y, particularmente desarrollos tormentosos, por lo que su principal cometido es el discernimiento entre estabilidad seca e inestabilidad húmeda. En un sentido operativo son índices de reconocimiento unánime por parte de todos los centros de predicción de condiciones de tiempo severo. Este estudio de todos estos índices lo haremos en clara conexión con el modelo GD, siendo ello un aspecto novedoso de este trabajo.

A) Índice K

El índice K viene definido por la expresión:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{D850} - (T_{700} - T_{D700}), \quad (VI.5.1)$$

dónde T y T_D son temperaturas de termómetro seco y temperatura de rocío respectivamente, evaluadas en los niveles báricos indicados.

Los valores numéricos de KI presentan una escala asociada a la probabilidad de tormentas en la zona. La ordenación es directa, esto es, los más altos valores de KI están asociados a las más altas probabilidades de desarrollo tormentoso. Con la información TEMP es posible elaborar mapas de escala sinóptica con isolíneas de KI que permiten zonificar probabilidades de tormenta.

En relación al problema del fuego que, como hemos visto anteriormente está asociado a la inestabilidad y a la sequedad, el índice KI debe presentar una ordenación coherente. El índice K viene a representar analíticamente la conjunción inestabilidad-humedad de tal forma que sobre el diagrama de categorías del modelo GD la orientación del gradiente de valores KI debería ser la que se presenta en la figura VI.5.1.

Figura VI.5.1. KI en el esquema del modelo GD.

Los valores más bajos de KI debe corresponder a los días tipo III (estable-secos) y los más altos en los días tipo II (inestable-húmedo). Si ello fuera así, al proceder sobre una valoración real los resultados deberían tener una ordenación que presentara su valor más bajo en los días tipo III, valores superiores y simétricos para los días tipo I y IV y los valores más altos para los valores tipo II.

En efecto, en la tabla VI.5.1. presentamos los valores medios de KI para cada tipo del modelo GD (periodo estival 1998-2005 en La Coruña a las 00:00, ver anexo XI).

Tabla VI.5.1. Valor promedio de KI en cada tipo GD, periodo estival 1998-2005

	K promedio días tipo I	K promedio días tipo II	K promedio días tipo III	K promedio días tipo IV
1998	17,37	18,50	-3,92	14,08
1999	14,72	27,22	3,21	12,06
2000	10,35	25,52	7,52	14,19
2001	13,71	29,76	-6,86	8,93
2002	10,90	27,99	0,51	13,96
2003	15,70	25,95	3,85	11,21
2004	13,92	28,00	-2,16	13,05
2005	3,41	31,10	-3,37	11,46
promedio KI todo el periodo	12,51	26,75	-0,15	12,37

Como puede observarse los resultados son absolutamente coherentes desde el punto de vista físico, no así desde el punto de vista operativo. Ya que la mayor ocurrencia de fuego viene a tener lugar para valores intermedios del índice K (días tipo I). Ni mucho menos ello significa que el índice K no tenga proyección sobre la predicción de fuego, simplemente hay que interpretar el índice K en sus justos términos. De esta manera un día de índice K muy alto es un buen índice de muy baja ocurrencia de fuego; las otras posibilidades quedan difuminadas. En definitiva el índice K podría ser un extraordinario índice para predecir días de muy baja probabilidad de fuego (inestables-húmedos tipo II). Y ello tiene su importancia. La razón de por qué el índice K sólo es un índice parcial en la predicción de fuego se deriva de la esencia del propio índice visualizada en la

mencionada figura VI.5.1. El índice K, como es lógico, viene a simetrizar la inestabilidad seca (tipo I) con la estabilidad húmeda (tipo IV), otorgando idénticos valores a ambos tipos y ello resulta claramente alejado de la realidad en la ocurrencia de fuego. Siendo ello así, algún experimento aislado podría inducir a error; tal sería el caso de un periodo en el que escasearan los días tipo I y IV con clara supremacía de días tipo III y II. Con tales circunstancias el índice K se correspondería bien con la actividad de fuego, ordenándose ésta en forma más intensa opuestamente a los valores crecientes de KI. El ficticio investigador proclamaría que el índice K es un índice completo que explica correctamente la actividad de fuego. Paradójicamente, otro investigador podría proceder sobre un periodo en el que escasearan los días II y III, enfrentándose a un predominio de valores intermedios de KI, que con toda lógica, se corresponderían con resultados de ocurrencia de fuego muy diversas (Tipos I y IV). Este segundo investigador proclamaría, con toda razón, que el índice K es absolutamente inútil en el problema del fuego.

En definitiva, pensamos, que las contradictorias descripciones anteriores se derivan del hecho de no valorar el índice K en sus justos términos.

B) Índice Total Totals (TTI)

Otro índice de unánime reconocimiento y generalizado uso en los centros de análisis de desarrollo convectivo local es el Índice Total Totals (TTI). Dicho índice viene definido por:

$$TTI = (T_{850} - T_{500}) + (Td_{850} - T_{500}), \quad (VI.5.2)$$

Con la notación idéntica ala del índice K, considerado anteriormente

De forma similar al KI la ordenación es directa, a mayor valor de TTI mayor probabilidad de tiempo severo

También aquí podemos visualizar (figura VI.5.2.) como el gradiente de TTI se dirigiría desde el tipo III al tipo II, con plena simetría de los tipos I y IV, esto es, idéntico compromiso al que se presentaba en el caso del índice K.

Figura VI.5.2. TTI en el esquema del modelo GD.

En valoración sobre el periodo real estival 1998-2005 en La Coruña a las 00:00 (ver anexo XI) los resultados obtenidos se exponen en la tabla VI.5.2.

Tabla VI.5.2. Valores promedios anuales acumulados de TTI en cada clase GD periodo estival 1998-2005 en Galicia y promedio de todo el periodo.

	TT promedio días tipo I	TT promedio días tipo II	TT promedio días tipo III	TT promedio días tipo IV
1998	40,91	44,93	25,63	39,32
1999	38,84	46,61	30,42	39,06
2000	37,44	47,31	33,54	40,97
2001	40,14	46,56	26,34	39,22
2002	40,35	47,68	30,64	39,97
2003	41,68	45,47	33,59	38,58
2004	38,22	46,36	25,48	40,52
2005	34,49	50,30	28,09	39,93
valor promedio TT todo el periodo	39,01	46,90	29,22	39,70

Los mayores valores de TTI se localizan en los días tipo II y los menores en los tipo III con plena simetría I-IV.

Todo lo dicho sobre el índice K puede ser reproducido en rigurosos términos para el TTI.

Podría, llegados a este punto, valorarse cual de los dos índices, TTI o KI, puede ser más conveniente en el problema del fuego, y en nuestra opinión, no siendo útiles en forma completa ninguno de ellos, el índice K presenta mayor recorrido numérico lo que da mayor poder de discernimiento.

C) Índice de Showalter

La expresión del índice de Showalter (SI) es:

$$SI = T_{500} - T_p, \quad (\text{VI.5.3.})$$

donde T_{500} es la temperatura del termómetro seco a 500 hPa y T_p es la temperatura en 500 hPa de una burbuja que supuestamente asciende adiabáticamente de manera forzada y cerrada desde el nivel de 850 hPa. T_{500} se obtiene a partir de los datos de radiosondeo pero el procedimiento de obtención de T_p requiere de un análisis aerológico más profundo que conlleva la determinación del Nivel de Condensación Forzado (LCL) partiendo como nivel superficial de 850 hPa.

El Índice de Showalter (SI) es una medida de la inestabilidad potencial de la atmósfera en el estrato 850-500 hPa y nos indica la posibilidad de desarrollo tormentoso. Cuanto más pequeño sea el resultado de SI obtenido mayor es la probabilidad de desarrollo tormentoso. Dicho de otro modo, cuanto más a la derecha se sitúe T_p con respecto a la T_{500} en un diagrama aerológico, mayor será la inestabilidad que da lugar a la convección húmeda responsable del tiempo severo (ver figura VI.5.3).

Figura VI.5.3. Posición de T_p con respecto a T_{500} en las diferentes situaciones de estabilidad.

En este caso (figura VI.5.4.) el gradiente de SI dentro del esquema teórico del modelo GD se dirigiría desde el tipo II al tipo III, defiriendo en sentido, al que presentaba el gradiente observado al estudiar los índices KI y TTI. Según SI los valores más altos serían los días estables secos en los que la probabilidad de tormentas es menor, siendo los valores más bajos los correspondientes a los días inestables húmedos con fuerte desarrollo convectivo. La simetría de los valores intermedios correspondientes a los tipos I y IV también existiría aquí.

Figura VI.5.4. Gradiente de SI en el esquema del modelo GD.

En efecto, los valores reales de SI en el periodo estival 1998-2005 en La Coruña a las 00:00 (ver anexo XI) presentan los resultados expuestos en la tabla VI.5.3.

Los resultados obtenidos en este caso son también físicamente coherentes pero nos encontramos con similares problemas operativos que los hallados en el KI y TT. En este caso la mayor ocurrencia de fuego también se sitúa en valores intermedios de SI (tipo I). La única diferencia respecto a los anteriores índices es que en el caso del SI los valores asociados a la baja ocurrencia de fuego son los más bajos. Todo lo dicho para el índice KI y TTI respecto a la proyección como índices de fuego podría trasladarse a éste

teniendo en cuenta este cambio en el sentido del gradiente dentro del esquema. Pero insistimos que para utilizarse como índice de riesgo de fuego debe ser interpretado adecuadamente en sus justos términos.

Tabla VI.5.3. Valores promedio de SI para cada uno de los tipos GD en Galicia.

Veranos 1998-2005

	SI promedio días tipo I	SI promedio días tipo II	SI promedio días tipo III	SI promedio días tipo IV
1998	4,96	4,95	12,12	6,26
1999	6,02	2,74	10,63	6,40
2000	6,83	3,52	9,22	6,15
2001	4,68	2,14	12,56	6,69
2002	5,56	3,05	10,21	6,70
2003	4,84	3,37	9,45	7,65
2004	6,54	5,09	12,30	6,59
2005	7,64	4,84	12,08	5,98
promedio SI	5,88	3,71	11,07	6,55

D) Índice Lifted

El índice Lifted (LI) es una versión más afinada del índice de Showalter, teniendo en cuenta la humedad del estrato más próximo a la superficie.

La expresión del índice de Lifted es similar a la del SI:

$$LI = T_{500} - T_p, \quad (\text{VI.5.4})$$

donde la notación es idéntica a la del SI excepto en el T_p , que en este caso es la temperatura en 500 hPa de una burbuja que supuestamente asciende adiabáticamente de

manera forzada y cerrada desde el nivel promedio del estrato de los 100 hPa más próximos a la superficie. La finalidad es tomar las condiciones de temperatura y humedad del limitante inferior del estrato reduciendo los efectos diurnos.

Igual que el SI en LI la ordenación es inversa y a menor valor del índice mayor probabilidad de tormentas severas.

En este caso (figura VI.5.5.), como en el SI, el gradiente de LI dentro del esquema teórico del modelo GD se dirigiría en el sentido días inestables húmedos (tipo II) a días estables secos (tipo III), existiendo simetría en los I y IV.

Figura VI.5.5. Gradiente de LI en el esquema del modelo GD.

Ciertamente eso es así si analizamos los resultados de LI en el periodo estival 1998-2005 en La Coruña a las 00:00 (ver anexo XI) presentados en la tabla VI.5.4.

Tabla VI.5.4. Valores promedio anuales de los valores de LI en cada uno de los tipo GD de Galicia del periodo estival 1998-2005, y valor promedio.

	LI promedio días tipo I	LI promedio días tipo II	LI promedio días tipo III	LI promedio días tipo IV
1998	4,09	2,13	9,91	6,43
1999	5,38	2,10	6,99	6,06
2000	3,95	2,04	6,95	5,14
2001	3,26	1,72	8,77	5,78
2002	4,71	2,11	7,34	6,92
2003	2,91	3,60	7,73	6,55
2004	4,61	4,53	9,07	5,90
2005	5,64	-0,16	9,42	5,39
valor promedio LI	4,32	2,26	8,27	6,02

Los resultados obtenidos mantienen la coherencia física.

Todo lo expuesto desde un punto de vista operativo para el SI, TT y KI en cuanto a la proyección como índice de fuego, puede ser dicho para el LI, principalmente en la determinación de días de baja actividad de fuego. Valores bajos de LI ayudan a discernir los días de bajo riesgo de fuego pero el resto de clases de riesgo quedan definidas muy ambiguamente. Concretamente los días de máximo riesgo permanecen en los valores intermedios.

E) CAPE (Convective Available Potencial Energy)

En esta tesis ha sido ya presentada cual es la forma de obtención del parámetro CAPE, para lo cual es necesario un análisis aerológico y la determinación del LFC (Nivel de Libre convección) y el EL (Nivel de Equilibrio), aunque también pueden calcularse una CAPE a partir del (Nivel de Condensación Convectivo) CCL y de su Nivel de equilibrio correspondiente (EL').

En términos energéticos es el Pozo de Potencial situado entre la base de la nube (Nivel de Libre Convección) y el techo (Nivel de Equilibrio), y es un parámetro indicativo de la capacidad que existe en la columna atmosférica para generarse procesos convectivos que puedan dar lugar a fenómenos de tiempo severo. A mayor valor de CAPE mayor probabilidad de tormentas severas.

Siguiendo una coherencia física los valores de mayor CAPE deberían concentrarse en los días inestables húmedos del esquema GD, permaneciendo los valores más bajos en los días estables secos. Los valores intermedios permanecerían simétricos (ver figura VI.5.6).

Figura VI.5.6. Gradiente de CAPE en el esquema del modelo GD.

Los resultados (ver anexo XI) para La Coruña desde 1998 a 2005 durante los periodos estivales, presentados en la tabla VI.5.5., nos muestran que existe una coherencia física.

Tabla VI.5.5. Valores promedios anuales de CAPE para cada tipo GD durante los veranos del periodo 1998-2005 en Galicia.

	CAPE (kJ/kg) promedio días tipo I	CAPE (kJ/kg) promedio días tipo II	CAPE (kJ/kg) promedio días tipo III	CAPE (kJ/kg) promedio días tipo IV
1998	11,85	120,18	0,35	17,59
1999	4,52	74,08	0,50	11,27
2000	18,26	58,79	1,89	15,31
2001	92,81	63,88	0,37	28,36
2002	1,80	61,23	2,85	5,87
2003	59,71	29,70	0,45	6,84
2004	5,39	50,02	1,44	17,45
2005	0,01	105,20	0,20	13,68
promedio CAPE	24,29	70,38	1,01	14,55

Desde un punto de vista operativo CAPE adolece de las mismas ventajas e inconvenientes que los índices anteriormente expuestos aquí en cuanto a la proyección como índice de fuego. El valor de CAPE puede contribuir en la determinación de días de baja actividad de fuego. Valores altos de CAPE se corresponden con los días de bajo riesgo de fuego pero el resto de clases de riesgo quedan difusas. Aquí también los días de máximo riesgo permanecen en los valores intermedios.

CAPÍTULO VII:

OTRAS ESCALAS METEOROLÓGICAS

Aunque el espíritu de esta tesis es la descripción del fuego a escala meso, vamos a analizar el fenómeno a otras escalas meteorológicas. El interés de considerar escalas espaciotemporales mayores radica en tratar de encontrar un enlace o proyección sobre la meso a partir de la multitud de esquemas predictivos diseñados para este tipo de escalas (Hirlam, ECMWF, etc). Como se verá, existen algunos fenómenos de alto interés como son los denominados por nosotros efectos dipolares, y que haremos de ellos un herramienta conveniente en la predicción y explicación del fuego.

VII.1. Escala planetaria: El Niño y los incendios en Galicia.

A continuación vamos a abordar una serie de consideraciones de circulación a nivel planetario. En general, admitida la influencia de la estabilidad y la sequedad en la aparición del fuego (modelo GD). Podemos establecer el siguiente esquema:

A. *Circulación general CGA en régimen estable:* Con ello queremos denotar que la circulación general en sí misma, que tiene por objeto intercambiar calor entre la zona intertropical y las zonas polares, produce un reparto de masas secas y húmedas y dinámicas verticales (ascendente y descendente) que se va a traducir en el favorecimiento del fuego para aquellas zonas del planeta en que queden acoplados la baja estabilidad con la sequedad.

Así mismo, el océano presenta movimientos de agua que también contribuyen a neutralizar el desigual balance radiativo en el planeta. Las corrientes marinas son los mecanismos dinámicos de intercambio de calor en el océano. En general, las costas adyacentes a corrientes cálidas presentarán un favorecimiento de la cubierta vegetal, ocurriendo lo contrario para las costas adyacentes a las corrientes frías.

Naturalmente estos comportamientos descritos para las atmósfera y el océano tienen carácter climático (estacionario) y son los que producen la heterogeneidad en el planeta que todos conocemos (A Escala Climatológica).

B. *Alteraciones de la CGA y de las corrientes marinas a menor escala.* De acuerdo a lo anterior cuando una zona del planeta está con carácter estacionario sometida a la presencia de masas atmosféricas húmedas y corrientes marinas cálidas, el desarrollo de la cubierta vegetal está muy favorecido. Pero, si de forma transitoria en el tiempo este

régimen se rompe, las condiciones de fuego pueden aparecer de forma intensa en esas áreas. Quizás el mejor ejemplo lo podamos ver en la costa extremo oriental asiática, a la que con carácter regular y estacionario llegan masas atmosféricas de carácter húmedo asociadas a la corriente marina cálida que llega del E a la zona. Esta corriente cálida (Corriente Ecuatorial) tiene un marcado carácter zonal Este-Oeste sobre el Pacífico y procede del empuje que la corriente meridional Sur- Norte de Humboldt produce.

Esta corriente de Humboldt actúa como el auténtico rotor del Pacífico Sur y deriva de la Potente Corriente Circumpolar Antártica (ver figura VII.1.1).

Figura VII.1.1. Corrientes Oceánicas. Fuente: <http://atlas.snet.gob.sv>

Pues bien, cuando con periodicidad variable (entre 1 y 5 años) la corriente de Humboldt deja de existir la acción de rotor cesa dejándose de producir la llegada de masas cálidas a las costas orientales asiáticas. Con ello, como es bien sabido, se abren estaciones secas en el sudeste asiático y, en consecuencia, aparecen condiciones proclives a la aparición del fuego (Kitzberger et al 2001)(Swetnam and Betancourt 1992). Esta rotura o desaparición de la corriente de Humboldt se la conoce como *El Niño*, por acontecer en la época Navideña en la Costa occidental de Sudamérica. Los pescadores del Perú no realizan apenas capturas al desaparecer la zona de emergencia de agua por cesar la corriente de Humboldt.

Usualmente muchos investigadores han centrado su atención en cómo la aparición del *Niño* (ENSO: El Niño - Oscilación del Sur) puede afectar, en sentido de variabilidad climática, a diferentes regiones del Pacífico preferente. Otros autores van más allá buscando una conexión entre la aparición del Niño y variabilidades climáticas de otras zonas del planeta. Nosotros vamos a estudiar aquí la posibilidad de que la aparición del *Niño* pudiera tener un efecto “*cascada*” que pudiera implicar una alteración en la aparición del fuego sobre la Península Ibérica. Que sepamos, no hay en la bibliografía referencias que asocien tal evento con la aparición de fuego en forma determinista. Por nuestra parte, y en un sentido escuetamente estadístico presentamos en la tabla VII.1.1 los valores de la anomalía de temperatura (Índice Oceánico del Niño, ONI) y los incendios en Galicia para las campañas de verano 1998-2005. Los valores más altos de ONI están asociados a episodios del Niño. La Correlación de ambas series presenta un coeficiente de -0.34 que viene a significar que la actividad de fuego es tanto mayor cuanto menor es el valor de ONI. Podríamos, por tanto, establecer la conclusión de que la actividad del Niño obra en oposición de fase frente a la aparición del fuego en nuestra zona de estudio. Desde un punto de vista estadístico cuando hay Niño en el Pacífico(ONI alta) los incendios en Galicia se reducen.

Tabla VII.1.1. Incendios anuales en verano en Galicia y ONI verano. 1988-2005.

AÑO	NÚMERO DE INCENDIOS	ONI en la región 3.4 (Índice Oceánico del Niño en el pacífico)
1988	2804	-1,1
1989	7481	-0,3
1990	3673	0,4
1991	3140	0,9
1992	2351	0,2
1993	3025	0,4
1994	4875	0,6
1995	6998	-0,3
1996	6352	-0,2
1997	4295	2
1998	8968	-1
1999	4688	-0,9
2000	7181	-0,3
2001	4984	0,1
2002	6358	0,9
2003	5345	0,4
2004	3849	0,8
2005	5537	0,3

VII.2. Índice NAO (North Atlantic Oscillation) y riesgo de fuego.

La Oscilación del Atlántico Norte (NAO en sus siglas en inglés) consiste en una oscilación atmosférica de masa entre el anticiclón subtropical de las Azores y la región de bajas presiones del Frente Polar. La NAO plasma la variabilidad de la circulación atmosférica sobre todo el continente europeo y, por lo tanto, puede ser utilizada también para el estudio de variabilidad atmosférica sobre la Península Ibérica, especialmente en invierno, cuando es más pronunciada.

Walker (1924) identificó por primera vez la NAO a principios del siglo XX. Ha sido definida posteriormente mediante un índice que mide la diferencia de presión en superficie entre Ponta Delgada (Azores) y la estación de Stykkisholmur (Islandia). Otra versión del índice NAO es la propuesta por Jones et al. (1997), que sustituyen Ponta Delgada por Gibraltar y Stykkisholmur por Reykjavik.

Existen varios estudios que han mostrado la importancia de NAO en el clima invernal en el Atlántico Norte, en definitiva en Europa: Hurrell (1995,1996); Rogers (1997), Quian et al. (2000), Hurrell et al. (2003) y Gimeno et al. (2004). Otros aspectos, como la variación direccional de vientos han sido estudiados por Hernández (2004); Hurrell y Van Loon (1997) y Osborn et al. (1998) analizan la precipitación invernal en el oeste peninsular y costa atlántica marroquí; Da Camara et al. (2004) realizaron una caracterización de 26 tipos distintos de circulación atmosférica y estudiaron su impacto en el régimen de precipitación invernal en Portugal, encontrando para muchos de ellos correlaciones significativas con el índice NAO. También se han realizado trabajos (Sánchez, 2005) que relacionan la variación de la NAO con la insolación en la Península Ibérica y Baleares

Desde el punto de vista físico meteorológico el fenómeno NAO puede describirse como la perturbación que puede sufrir el radio de giro del flujo sobre el Atlántico Norte (figura VII.2.1) ; valores bajos del radio de curvatura (alta curvatura) están asociados a la fase positiva y lo contrario lo está a la negativa. En términos sinópticos la fase negativa se corresponde con un mantenimiento en la dirección zonal (O-E) que desde el Atlántico se adentra hacia el Mediterráneo. Una NAO positiva quiere decir que la presión en superficie en Islandia es menor que en Azores (El anticiclón de las Azores es potente) y se favorecen entradas de masas del E en la Península Ibérica.

Se suele observar, en concordancia con la definición del índice, que los años con índice NAO negativo se corresponden con años especialmente lluviosos sobre la Península Ibérica y relativamente secos en latitudes mayores, mientras que para los años con índice NAO positivo se observa el fenómeno opuesto. Trigo et al. (2001,2004a) encontraron que para meses con elevado índice NAO, Europa central y la Península Ibérica están bajo la influencia de circulación anticiclónica, presentando por lo tanto valores de nubosidad y precipitación reducidos.

VII.2.1. NAO: fases positiva y fase negativa. Fuente: www2.uah.es

En relación al problema del fuego, parece oportuno pensar que las fases positivas de NAO deben estar asociadas a más alta ocurrencia de incendios en la Península Ibérica. En cualquier caso no hemos realizado estudios numéricos que nos permitan aportar conclusiones definitivas al respecto. Sí podemos decir que el fenómeno NAO podría constituir una disposición bórica que generara lo que a continuación aquí denominaremos efecto dipolar peninsular.

VII.3. El fuego a escala sinóptica: Efectos dipolares

Un análisis sinóptico incluye el estudio y la deducción del estado presente o futuro de la atmósfera valiéndose de información meteorológica de una determinada región. Si la información es observada (campo de presiones, geopotenciales, etc) la interpretación se realiza de la atmósfera presente. Si la información es fruto de una predicción (modelos numéricos como el Hirlam), la interpretación se realiza para atmósferas futuras. Las variables, sean observadas o predichas, son representadas a escala de miles de km (representaciones a macroescala). El análisis a esta escala suele ser producto tanto de valoraciones objetivas como de recursos subjetivos y, por tanto, estas responsabilidades suelen recaer sobre personal experto.

El análisis sinóptico permite interpretar de forma clara el comportamiento de los fenómenos propios de tal escala, como los acercamientos frontales, rotación de vientos, etc. Sin embargo, las dinámicas de menor escala, como brisas o desarrollo convectivo local sólo pueden ser extraídas por criterios subjetivos del predictor. De ahí el requerimiento de profunda experiencia y conocimiento del lugar de un buen predictor.

Todos los centros de predicción del mundo elaboran mapas de análisis presente y de predicciones a medio plazo. Nosotros, en lo que al problema del fuego se refiere, hemos usado particularmente cartas del MET-OFFICE (UK), así como representaciones de columna atmosférica local derivadas de los radiosondeos efectuados por el INM (España). Las cuestiones técnicas sobre este aspecto son matizadas en el capítulo V.

En relación al problema del fuego, existen una serie de situaciones sinópticas que son más favorecedoras que otras. Autores como Brotak y Reifsnyder (1977), Brotak (1980), o de Street y Birch (1986) han analizado secuencias temporales particulares en niveles medios y bajos como índices para estimar la posibilidad de aparición de fuego. Consecuencias de la irrupción de masas de aire secas, presencia de frentes fríos (FF) o cálidos (FC) con escasa precipitación, ciclogénesis, etc, como situaciones favorecedoras del fuego, son enunciadas por ellos.

No debe constituir sorpresa, en modo alguno, el hecho de que la situación sinóptica presente interés en la aparición del fuego ya que, en definitiva, dicho análisis (sinóptico) nos permite distinguir tipos de masas y sus movimientos. Por lo tanto, un buen análisis sinóptico, especialmente en los niveles bajos, debe ser una herramienta necesaria siempre.

En efecto, en capítulos anteriores hemos explicado que una masa seca e inestable es un escenario propicio al fuego. Ello, en términos sinópticos, equivale a decir, que la determinación de zonas espaciales caracterizadas por sus sequedad e inestabilidad solapadas, son las regiones a vigilar con singular interés.

Pero, sin duda, el uso del análisis sinóptico que presentamos en este trabajo, con mayor interés, es el que está orientado a la determinación de lo que aquí denominamos efectos dipolares. En Dinámica de la Atmósfera se entiende por dipolo, respecto de un parámetro, la variación que sufre dicho parámetro como consecuencia de que el movimiento horizontal de masa atraviese una discontinuidad (obstáculo, cambio de naturaleza de suelo, etc). Como ejemplo es bien conocido el efecto dipolar que respecto de la humedad (y de la temperatura) establece una sierra perpendicular al movimiento de la masa. Otro ejemplo podría ser el derivado de que una masa transite a través de una amplia zona con poca evaporación, resultando de ello que una masa inicialmente húmeda por su procedencia marina pueda, al cabo de muchos kilómetros y cruces orográficos, convertirse en una masa seca. Este aspecto es singularmente importante en el problema del fuego y vamos a abundar en ello para el caso peninsular.

Si en la península irrumpe una masa por el SE, esto es, proveniente del Mediterráneo, cuando dicha masa alcance la vertiente atlántica es una masa seca. Además, si ello acontece en verano, el transito sobre un suelo peninsular caliente la torna en inestable. Que ello es así queda bien probado por el hecho de que cuando sobre la península dominan vientos del primer y segundo cuadrante la actividad de fuego en la vertiente atlántica se hace más intensa. Simétricamente cuando la advección es del tercer y cuarto cuadrante los incendios acontecen en la vertiente mediterránea; las advecciones del norte están asociadas a los incendios en Andalucía mientras las del sur lo están a los incendios en la zona cantábrica.

De esta manera podemos hablar de un dipolo E-O sobre la península cuando domina la advección de componente E, un dipolo N-S cuando domina la del norte, y así sucesivamente. En el capítulo IX, en el que nos referiremos a eventos singulares de los últimos años mencionaremos este aspecto.

Establecido este esquema de dipolos peninsulares podemos explicarnos con relativa facilidad el hecho de que las series temporales de números de incendios diarios presenten determinados sincronismos o asincronismos en un determinado periodo. En términos ondulatorios podría decirse que las ondas diarias de fuego de tres regiones a considerar, Andalucía, Galicia y Cataluña, pueden entrar en fase unas con otras para cada situación dipolar, así, en la figura VII.3.1 presentamos las ondas de fuego diarias de Galicia y Cataluña en septiembre de 2000, presentándose una apreciable oposición de fase hasta el día 10; mientras en Cataluña hay una baja actividad de fuego en Galicia es bastante apreciable.

Figura VII.3.1 Número de Incendios en Galicia y Cataluña del 3 al 13 de septiembre de 2000.

En la figura VII.3.2. se muestra, dentro del mismo periodo, el sincronismo de fuego existente entre Galicia y Andalucía. Es la situación propia de un dipolo E-O sobre la península. (ver mapas sinópticos en anexo XII).

Figura VII.3.2. Número de Incendios en Galicia y Andalucía del 3 al 7 de septiembre de 2000.

La visualización de estos dipolos es muy cómoda con la ayuda de la información satelitaria. En las figuras VII.3.3 a VII.3.6 se observan los incendios y las trazas de humo que indican bien a las claras cual era la advección de masa en cada caso. En la primera de ellas (VII.3.3) podemos ver la localización de los voraces incendios que acontecieron en Galicia en Agosto de 2006 cuando irrumpió una circulación de componente E, y puede verse como el humo escapa al mar; En la figura siguiente (VII.3.4) podemos ver el caso de los incendios de Canarias de 2007. Pero sin duda los eventos de fuego más destacados a nivel mundial en los últimos años fueron los acontecidos en Grecia y en California (Figuras VII.3.5 y VII.3.6). En la primera de ellas los denominados incendios del Peloponeso (y no sólo los del Peloponeso), se localizaron en zonas de advección con recorrido previo terral, lo que podríamos

denominar el sotavento del Peloponeso. En el caso de California se observa claramente una advección del E (lo que ellos denominan viento de Santana). No presentamos imágenes aquí, pero podemos imaginarnos fácilmente cual sería la imagen de una oleada de incendios en Australia: Incendios en toda la franja costera SE con el humo desplazándose hacia el mar casi perpendicularmente a la línea de costa.

Figura VII.3.3. Incendios en Galicia y Portugal en agosto 2006. Fuente: NOAA

Figura VII.3.4. Incendios de Canarias en julio-agosto de 2007. Fuente: NOAA

Figura VII.3.5. Incendios de Grecia agosto 2007. Fuente: NOAA

Figura VII.3.6. Incendios de california (USA) en octubre 2007. Fuente: NOAA

Para terminar, cabría hacer la reflexión de que el hecho de que la actividad de fuego en la Península Ibérica sea predominante en las zonas costeras tenga mucho que ver con la estructura dipolar de la Península Ibérica.

CAPÍTULO VIII:

EL MODELO GD A ESCALA REGIONAL

Ya desde el principio nos hemos esforzado en señalar que el carácter continental o costero del lugar conduce a interpretaciones muy distintas en el problema del fuego. Particularmente, hemos insistido en que el problema del fuego adquiere singular importancia en las zonas costeras, debido a la que hemos denominado oposición entre las condiciones meteorológicas y climatológicas. En definitiva, en la región centro peninsular el carácter de la masa es seco (periodo de verano) para todo tipo direcciones de advección de masa. Aquí, ahora, vamos a hacer algunas consideraciones al respecto sobre la base de la diada (**e**, **D**) del modelo GD.

VIII.1. Tendencias generales de la diada (e**, **D**) en zonas costeras y continentales.**

Para el estudio de la tendencia de los parámetros **e** y **D** tomaremos por separado una región costera como es la de Galicia, y una región continental como es la conformada por Extremadura, la Comunidad de Madrid y la provincia de Guadalajara. (Los resultados diarios pueden consultarse en anexos II , VII y VIII).

a) ÁREA COSTERA: Galicia (radiosondeo La Coruña).

En relación a **D**, en la figura VIII.1.1 se presentan los valores medios mensuales frente a los números de incendios en Galicia durante el periodo 1999-2005. En ella se observa que, en puro sentido estadístico, la sequedad irrumpe con fuerza en los meses de julio y agosto y disminuye drásticamente en el mes de septiembre, lo cual puede ser interpretado como que el área gallega en los meses de julio y agosto presenta una componente de humedad propia del dominio seco ($D > 12$). A diferencia, el mes de septiembre requerirá de intervalos temporales puntuales para registrarse en el dominio seco. En otras palabras, los meses de julio y agosto en Galicia son intrínsecamente proclives al fuego al existir un dominio de días tipo III y I. Si apareciese un intervalo con baja estabilidad, éste sería el detonante para las oleadas de fuego.

En cuanto a la estabilidad, hay que recordar su singular influencia sobre el fuego. En la figura VIII.1.2. podemos observar los valores medios mensuales frente a la actividad de fuego y puede apreciarse que presenta casi una disminución lineal de julio a septiembre. Debido a que la estabilidad presenta un valor alto en julio, podríamos pensar una mayor frecuencia de días tipo III o IV, pero al ser la sequedad ligeramente apreciable sobre la media, la conclusión correcta es que habrá un predominio de días tipo III. En cuanto a agosto la relativa baja estabilidad viene a acoplarse con la mayor sequedad del año, siendo éste un explosivo resultado en cuanto a fuego. En septiembre la más baja

estabilidad va a solaparse con un estado de humedad alto, lo cual puede interpretarse en términos de apariciones de días tipo II.

VIII.1.1. D media mensual (La Coruña) y número de incendios en Galicia 1999-2005.

VIII.1.2. e media mensual (La Coruña) y número de incendios en Galicia 1999-2005.

Debemos tener en cuenta que la estabilidad se comporta de manera diferente si nos encontramos en dominio seco que si nos encontramos en dominio húmedo, en lo que a riesgo de fuego se refiere. La e es influyente en la aparición del fuego en el dominio seco (a menos estabilidad en dominio seco más incendios). Pero en el dominio húmedo a menos estabilidad menos incendios.

b) ÁREA CONTINENTAL: Extremadura, Madrid y Guadalajara (radiosondeo Madrid)

En esta zona la sequedad está prácticamente asegurada para los tres meses y puede observarse un buen compromiso entre la sequedad y la actividad de fuego. En la figura VIII.1.3. se ilustra este comentario. En cuanto a la estabilidad (ver figura VIII.1.4.) se refiere, puede observarse que es muy baja sobre todo en los meses de julio y agosto, lo cual va a implicar una gran frecuencia de días tipo I. Las condiciones de fuego son extraordinariamente severas de forma casi continua.

Una superficial lectura de estos resultados induciría a pensar que debería registrarse en términos absolutos mayor actividad de fuego en esta región que en Galicia. Evidentemente ello no es cierto por razones externas al planteamiento que aquí se hace (la densidad de material combustible es incomparablemente mayor en la región gallega).

En todo caso, lo que a nosotros nos preocupa es, más allá de los números absolutos de incendios que se registran, tratar de resolver el enigma de porqué unos días hay más incendios que otros. A tal efecto, para ambas regiones, Galicia y zona centro (Extremadura, Madrid y Guadalajara), hemos calculado los pesos sequedad-humedad y estabilidad-inestabilidad en cuanto a actividad de fuego (con radiosondeo de La Coruña y Madrid respectivamente). En las tablas VIII.1.1. a VIII.1.4. se presentan los resultados. Cada tabla, en sí misma, no merecería mayor comentario, pero un análisis comparado nos permite visualizar una semejanza casi total. Esta extraordinaria semejanza de comportamientos nos debe hacer recapacitar sobre el hecho de que realmente estemos describiendo correctamente la incidencia meteorológica sobre el fuego, tanto en una zona como en otra. Si ello fuera así, no habría causa para no aplicar el modelo GD en una región puramente continental. Vamos disponernos a ello.

VIII.1.3. D media mensual (Madrid) y número de incendios en zona centro 1999-2005.

VIII.1.4. e media mensual (Madrid) y número de incendios en zona centro 1999-2005.

Tabla VIII.1.1.Resultados dominio seco y húmedo Galicia 1999-2005

	seco			húmedo		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR
1999	2852	40	71.3	1836	52	35.31
2000	4353	37	117.6	2828	55	51.42
2001	3413	36	94.81	1571	56	28.05
2002	3307	31	106.7	3051	61	50.02
2003	3827	45	85.04	1518	47	32.3
2004	2349	36	65.25	1500	56	26.79
2005	3425	49	69.9	2112	43	49.12
Total	23526	274		14416	370	
DFR (medio)	87.2			38.9		
NDFR	0.69			0.31		

Tabla VIII.1.2. Resultados dominio estable e inestable Galicia 1999-2005

	estable			inestable		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR
1999	2953	60	49.22	1735	32	54.22
2000	4809	64	75.14	2372	28	84.71
2001	3518	67	52.51	1466	25	58.64
2002	4919	72	68.32	1439	20	71.95
2003	2775	62	44.76	2570	30	85.67
2004	2443	68	35.93	1406	24	58.58
2005	3779	72	52.49	1758	20	87.9
Total	25196	465		12746	179	
DFR (medio)	54.05			71.67		
NDFR	0.43			0.57		

Tabla VIII.1.3. Resultados dominio seco y húmedo zona centro 1999-2005

	seco			húmedo		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR
1999	673	75	8.97	47	17	2.76
2000	1054	87	12.11	26	5	5.2
2001	971	78	12.44	70	14	5
2002	1062	76	13.97	81	16	5.06
2003	1131	81	13.96	106	11	9.63
2004	1131	81	13.96	88	11	8
2005	605	74	8.17	103	18	5.72
Total	6627	552		521	92	
DFR (medio)	11.94			5.91		
NDFR	0.67			0.33		

Tabla VIII.1.4. Resultados dominio estable e inestable zona centro 1999-2005

	estable			inestable		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR
1999	116	23	5.04	604	69	8.75
2000	151	15	10.06	929	77	12.06
2001	136	10	13.60	905	82	11.04
2002	150	14	10.71	993	78	12.73
2003	214	18	11.89	1023	74	13.82
2004	222	19	11.68	997	73	13.66
2005	131	15	8.73	577	77	7.49
Total	1120	114		6028	530	
DFR (medio)	10.25			11.36		
NDFR	0.47			0.53		

VIII.2. Modelo GD para Extremadura

Por su mayor actividad de fuego en términos absolutos, derivada sin duda de una mayor extensión de cubierta vegetal, vamos a estudiar el comportamiento del fuego en Extremadura sobre la información de la estación de radiosondeos de Lisboa. En la tabla VIII.2.1 presentamos los típicos valores. Como puede verse los resultados son absolutamente coherentes, e insistimos que no habría razón ninguna para que se hubieran registrado otras ordenaciones de riesgo (resultados diarios en anexo XIII).

Tabla VIII.2.1. Resultados GD periodo estival 2000-2005 en Extremadura con radiosondeo de Lisboa.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
2000	322	32	10,06	12	2	6,00	334	40	8,35	110	18	6,11
2001	296	31	9,55	24	4	6,00	333	40	8,33	86	17	5,06
2002	275	25	11,00	14	3	4,67	430	41	10,49	122	23	5,30
2003	284	21	13,52	0	0	0,00	439	47	9,34	161	24	6,71
2004	453	44	10,30	27	8	3,38	234	24	9,75	115	16	7,19
2005*	87	17	5,12	3	1	3,00	260	50	5,20	42	13	3,23
Total	1717	170		90	18		2030	242		636	111	
DFR (medio)	9,9			3,8			8,6			5,6		
NDFR	0,4			0,1			0,3			0,2		

* en julio de 2005 entre los días 4 y 14 ambos inclusive el número de incendios no es contabilizado por falta de datos de radiosondeo en Lisboa. Son un total de 59 incendios en esos días.

VIII.3. Modelo GD para Guadalajara

El tristemente episodio del “Incendio de Guadalajara” de 2005, que estudiaremos más adelante, no vino a ser sino un desgraciado eslabón de una cadena de fuego en nuestros suelos. Es necesario profundizar científicamente en el proceso del fuego de forma matemática, más allá de estudios puntuales.

La realidad parece habernos dado la razón plenamente en múltiples estudios de aparición de fuego en zonas como Galicia, oeste de Castilla y León, y como acabamos de estudiar, en Extremadura. Pero siempre hemos considerado zonas con un alto número de incendios, que consiguientemente, permiten un análisis con más base estadística. Evidentemente la provincia de Guadalajara dista mucho de ser un área de alta actividad de fuego. Pero a pesar de ello la aparición del fuego en esa provincia queda bien interpretada desde un sentido meteorológico a partir de información del radiosondeo de Madrid. En la tabla VIII.3.1 presentamos los resultados de aplicación del modelo, siendo estos absolutamente coherentes. (resultados diarios en anexo VII).

Tabla VIII.3.1. Resultados GD periodo estival 1998-2006 en Guadalajara con radiosondeo de Madrid.

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998*	45	32	1.41	1	5	0.20	7	4	1.75	2	7	0.29
1999	90	66	1.36	0	3	0.00	6	9	0.67	5	14	0.36
2000	93	73	1.27	0	4	0.00	14	14	1.00	0	1	0.00
2001	115	73	1.58	3	9	0.33	5	5	1.00	1	5	0.20
2002	87	68	1.28	0	10	0.00	10	8	1.25	7	6	1.17
2003	127	70	1.81	2	4	0.50	17	11	1.55	7	7	1.00
2004	112	69	1,62	2	4	0,50	18	12	1,50	6	7	0,86
2005	57	64	0,89	9	13	0,69	3	10	0,30	4	5	0,80
2006	69	69	1,00	2	10	0,20	4	10	0,40	4	3	1,33
Total	795	584		19	62		84	83		36	55	
DFR (medio)			1,3			0,3			0,9			0,7
NDFR			0,4			0,1			0,3			0,2

* en 1998 sólo fueron analizados un total de 48 días en verano por falta de datos disponibles.

CAPÍTULO IX:

ANÁLISIS DE ALGUNOS EVENTOS DE FUEGO PARTICULARES

Todo modelo predictivo, cuya estructura haya sido recogida bibliográficamente, debe satisfacer la interpretación de eventos que posteriormente vayan aconteciendo. Esta afirmación, por simple que parezca, es de un extraordinario calado a la hora de valorar la calidad de un índice predictor. De forma más estricta, hay que tener en cuenta que todo modelo de predicción está asentado en su parametrización sobre datos de un periodo concreto y particular; por ello, verificar la calidad del modelo en eventos posteriores a tal periodo, es un requisito indispensable para la credibilidad del modelo. En tal sentido, analizamos aquí algunos eventos que por razones generalmente tristes han acontecido en España a lo largo del periodo de realización de esta tesis.

Hemos incluido entre estos eventos destacados algunos incendios urbanos, lo cual nos abre la posibilidad de enunciar toda una teoría general del fuego, posibilidad que subyace a lo largo de toda esta tesis.

Llegados a este punto, quede aquí nuestro reconocimiento a aquellas personas que perdieron la vida en tales eventos.

IX.1. Episodio Guadalajara (del 16 de julio al 2 de agosto de 2005):

Este incendio costó la vida a 11 personas y fue el centro de atención de toda la comunidad nacional e internacional. Como casi siempre, el interés mediático se centró en tal evento ignorando que otros muchos estaban ocurriendo sincronamente. Si socialmente el tratamiento singular de este evento estaba totalmente justificado, no es menos cierto, que desde el punto de vista científico debemos advertir que se trató de toda una oleada de incendios que asolaron el centro peninsular en esas fechas.

Recogiendo notas de prensa encontramos que hubo importantes siniestros en Teruel, Zaragoza, Ciudad Real, Valladolid, Palencia, Zamora y Segovia. En la figura IX.1.1 aparecen señaladas la provincias de mayor actividad.

La situación sinóptica del día 17 (figura IX.1.2) se corresponde con sendos dominios anticiclónicos en el Atlántico y Mediterráneo, incluyendo éste último una Baja relativa sobre la vertiente mediterránea peninsular, sin duda de carácter térmico.

Figura IX.1.1 Provincias afectadas por el Fuego.

Figura. IX.1.2. Presiones en superficie del día 17 de Julio de 2005 a las 00.00 h UTC.

Por su extraordinario interés reproducimos los diagramas verticales de potenciales desde el día 14 hasta el día 20 (figuras IX.1.3 a IX.1.9) según radiosondeo de Madrid a las 00.00 h.

Figura. IX.1.3 Potenciales. 14 de julio de 2005. A las 00.00 h.

Figura IX.1.4 Potenciales. 15 de julio de 2005. A las 00.00 h.

Figura. IX.1.5. Potenciales. 16 de julio de 2005. A las 00.00 h.

Figura IX.1.6. Potenciales. 17 de julio de 2005. A las 00.00 h.

Figura. IX.1.7. Potenciales. 18 de julio de 2005. A las 00.00 h.

Figura. IX.1.8 Potenciales. 19 de julio de 2005. A las 00.00 h.

Figura. IX.1.9 Potenciales. 20 de julio de 2005. A las 00.00 h.

El periodo se caracteriza por una extraordinaria sequedad de la columna atmosférica (separación $h-h^*$). Si observamos minuciosamente S para el 14 de julio es prácticamente constante desde el suelo hasta 600 hPa, lo cual habla de una extraordinaria baja estabilidad (¡al límite de la indiferencia adiabática!); la humedad específica es prácticamente constante en todo ese estrato, lo cual indica claramente una extraordinaria difusión vertical de vapor. El día 15 permanece la situación sin variaciones sustanciales. De esta forma, la columna atmosférica estaba plenamente dispuesta para el desarrollo del fuego desde días antes del inicio del evento. El día 16 la estabilidad permanecía siendo muy baja (tabla IX.1.1) y la sequedad, si cabe aumentó.

Tabla IX.1.1. Aplicación del modelo GD hasta el 20/07/2005. Madrid 00.00 h.

Tipo	e (kJ/kg)	D (kJ/kg)	Día
I	1	42	14
I	2	38	15
I	2	49	16
I	6	47	17
I	5	23	18
III	7	22	19
I	3	40	20

A las 00.00 horas del día 16 el riesgo era según nuestro modelo extraordinariamente alto; 15 horas después se inició la tragedia.

En cuanto a los días inmediatamente posteriores 17, 18 y 19 las condiciones se suavizaron ligeramente dentro del extraordinario riesgo. Pero a partir del día 21 hubo un recrudecimiento de condiciones severas que hicieron, como de todos fue bien sabido, que el fuego progresara indefinidamente desbordando por completo todo tipo de operativo (ver tabla IX.1.2).

Sólo a partir del día 28 las condiciones meteorológicas fueron relativamente oportunas para el dispositivo antifuego.

Por fin el día 2 de agosto el operativo antifuego considera oficialmente apagado el incendio. El modelo GD a las 00.00 h. había tipificado ese día como tipo IV.

Tabla IX.1.2.Aplicación del modelo hasta la extinción del incendio. Madrid 00.00 h.

Tipo	e (kJ/kg)	D (kJ/kg)	Día
I	1	51	21
I	2	42	22
I	3	34	23
I	2	36	24
I	4	27	25
I	3	23	26
I	3	25	27
II	6	9	28
I	4	16	29
III	8	20	30
I	4	19	31
I	2	16	1
IV	6	7	2

Muchas teorías y opiniones pudieron y pueden ser expresadas al efecto pero, con la frialdad, que como científicos estamos obligados a mantener, lo que ocurrió en Guadalajara fue una terrible secuencia de días tipo I, y cuando la secuencia se cerró definitivamente con la aparición de un día tipo IV, se acabó el incendio.

En sentido dinámico vertical en la tabla IX.1.3. presentamos la variación de la aceleración ascendente en el estrato definido por 850 hPa y el primer nivel superior disponible en el radiosondeo de Madrid (punto notable o nivel tipo), suponiendo un incremento de 100° en 850 hPa. Puede verse que en la mayoría de los días la aceleración aumentaba con la altura, esto es, hacía condiciones de supertiro. Lo que explica la extraordinaria altura de las llamas que dio lugar a dificultades de vuelo bajo de las aeronaves sobre la zona. De ello pueden extraerse las razones de las enormes dificultades, con varios intentos abortados, con que se encontraron los pilotos de los helicópteros cuando se disponían a recuperar los cadáveres de los 11 trabajadores, y de la misma forma las que hallaron durante las tareas de extinción.

Tabla IX.1.3. Resultados de la dinámica vertical del incendio suponiendo un incremento de temperatura de 100 ° en 850 hPa. Unidades del SI excepto e que está en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

ND: Dato no disponible.

año	mes	día	e	T'850	S'	a850	a _{nivelsup}	$\frac{da}{dz}$
2005	julio	10	5	390,4	405800	3,33	3,38	>0
2005	julio	11	8	390,0	405940	3,34	3,37	>0
2005	julio	12	2	394,4	410260	3,29	3,39	>0
2005	julio	13	4	393,6	409300	3,30	3,24	<0
2005	julio	14	1	397,2	412780	3,26	3,34	>0
2005	julio	15	2	397,2	412860	3,26	3,27	>0
2005	julio	16	2	398,2	413860	3,24	3,34	>0
2005	julio	17	6	396,6	412160	3,26	3,23	<0
2005	julio	18	5	390,4	405700	3,33	3,36	>0
2005	julio	19	7	390,6	406360	3,33	3,36	>0
2005	julio	20	3	395,2	411270	3,28	3,28	>0
2005	julio	21	1	398,4	414370	3,24	3,39	>0
2005	julio	22	2	396,4	411830	3,26	3,35	>0
2005	julio	23	3	395,0	410150	3,28	3,33	>0
2005	julio	24	2	395,6	410580	3,27	3,37	>0
2005	julio	25	4	394,2	409170	3,29	3,35	>0
2005	julio	26	3	392,6	407680	3,31	3,43	>0
2005	julio	27	4	393,6	408510	3,30	3,40	>0
2005	julio	28	6	389,4	404500	3,35	3,33	<0
2005	julio	29	4	388,8	404060	3,35	3,42	>0
2005	julio	30	8	388,4	403780	3,36	3,44	>0
2005	julio	31	4	389,7	404940	3,34	3,32	<0
2005	agosto	1	2	390,0	405160	3,34	3,37	>0
2005	agosto	2	6	385,4	400730	3,39	3,32	<0

Ya desde otro punto de vista, ajeno por completo a nuestra forma de ver las cosas, reproducimos a continuación algunos comentarios que se hicieron en aquellos días:

- El ABC digital publicó el mismo día 16 en su edición digital: *“la Guardia Civil creyó como causa más probable una imprudencia de un grupo de personas que se encontraba realizando una barbacoa en el paraje conocido como Cueva de los Casares. Fuentes de la Subdelegación del Gobierno en Guadalajara informaron de que los presuntos causantes del fuego ya han sido identificados”*.

- El día 18 según declaraciones del Presidente de Castilla la Mancha a Europa Press respecto al origen del incendio dijo que se trató de una negligencia en una zona habilitada con barbacoas que ni siquiera llegaron a utilizarse, porque según las informaciones que disponía, el fuego se habría hecho en el suelo, y apuntó que la tragedia ocurrida *"nos obligará a prohibir los fuegos"* en cualquier caso, no en unas determinadas condiciones como ahora.
- La ministra de medio Ambiente, Cristina Narbona, el día 18 en informativos Telecinco, señaló que *"esta misma tarde van a prestar declaración las personas "con nombre y apellidos" responsables del incendio"*. Y *"hay que valorar el riesgo que se produce por culpa de personas con nombre y apellidos"*.
- El día 18, según Reuters, desde el Ministerio de Medio Ambiente se informó de que el origen del fuego se debió a una imprudencia ocasionada por el uso de una barbacoa. *"Quisiera insistir en que el origen parece confirmado que fue el uso inadecuado de una barbacoa"*, dijo la ministra de Medio Ambiente, Cristina Narbona, en declaraciones a la SER. El incendio fue causado al parecer durante una comida de un grupo de personas, que hicieron fuego el sábado en las inmediaciones de la Cueva de los Casares, en el término de Riba de Saelices. *"Quiero recordar que el origen del 90% o más de los incendios son negligencias o actos intencionados, como ha sido este al parecer"*, destacó por su parte la ministra de Medio Ambiente.
- En ABC el día 16 también se comentó: *"se ha extendido rápidamente a causa del fuerte viento que hoy sopla en Guadalajara"*. En este mismo sentido la Agencia EFE publicó el día 17: *"El fuerte viento que sopla estos días en la zona hace que el fuego se propague con rapidez"*. Y el día 18 EFE en declaraciones realizadas por la Consejera de Medio Ambiente el día 17: *"Esta noche la situación del fuego es un poquito más optimista porque el viento está más calmado que esta tarde, que era muy fuerte y racheado, lo que hacía muy difícil controlar las llamas"*. Y ese mismo día 18 EFE comentó que *"el viento fue el*

gran enemigo de las más de 200 personas que se volcaron en la labor de extinción del fuego declarado por la posible imprudencia de unos excursionistas que apagaron mal una barbacoa”.

- Reuters el día 18 publicó: *“Los fuertes vientos durante el domingo avivaron el fuego y las llamas llegaron a 40 metros de alto, según testigos. La canícula unida a la peor sequía desde los años 40, hacen que este verano gran parte de la Península sea como un polvorín para los incendios, que ya se han declarado en varias zonas”.*

IX.2. Episodio del 14 al 20 de marzo de 2005 en el norte y noroeste de la Península

Hemos expuesto que la ocurrencia del fuego no debe restringirse en su estudio al periodo estival; incluso hemos señalado que asociar la ocurrencia del fuego exclusivamente al periodo estival conduce a profundos errores en la concepción del problema. Es por ello, que aquí traemos el episodio del 14 al 20 de marzo de 2005, (semana previa a la Semana Santa). Tal periodo fue un auténtico sesgo de condiciones favorables al fuego. Todo el N-NW de la Península se vio involucrado en una oleada de incendios siendo Zamora y León las provincias más afectadas de nuestra Comunidad Autónoma. En la figura IX.2.1 y figura IX.2.2 se presentan los números de incendios acontecidos en diversas provincias.

Figura IX.2.1. Número de Incendios en Galicia del 14 al 20 de marzo de 2005.

Figura IX.2.2. Número de Incendios en el oeste de Castilla y León del 14 al 20 de marzo de 2005.

La situación sinóptica del día 18 de marzo de 2005 (figura IX.2.3) presenta una circulación anticiclónica con componente sur para la zona mencionada. Esta disposición sinóptica viene a concordar perfectamente con lo que en el capítulo VII denominábamos dipolo S-N.

Figura IX.2.3. Análisis en superficie de 18 /3/ 2005 , 00.00 h UTC.

En la figura IX.2.4. se presenta el diagrama de potenciales del 18 de marzo en La Coruña a las 00.00 h. y en ella puede observarse, la constancia de S , la sequedad de los bajos niveles y ese cierto mantenimiento en la constancia de q , que da idea de la facilidad del transporte vertical de vapor (separación S-h).

Figura IX.2.4. Diagrama Potenciales del día 18 de Marzo de 2005 a las 00:00 h.

Bajo esta situación el fuego se ve muy favorecido en superficie.

En cuanto al modelo GD los días 18 y 19 fueron días tipo I según radiosondeo de La Coruña a las 00.00 h., siendo los días previos y posteriores de tipo II.

El interés de estudiar este evento radica en el hecho ya insinuado de que fue un breve sesgo de condiciones de fuego propicias y, como puede observarse, la aparición de fuego respondió plenamente a dicho sesgo de condiciones. Con ello queremos probar que en cuanto las condiciones se tornan favorables el fuego aparece de inmediato.

Como en el evento anterior, éste sin duda mucho más benévolo, reproducimos a continuación algunos comentarios que aparecieron en los medios de comunicación:

Publicado el día 18 de Marzo (Viernes) de 2005:

- Teletipo de la Agencia EFE: *“Incendio en Zamora: El fuego arrasó 701 hectáreas, el 40% arboladas, según el consejero”*.
- Teletipo Europa Press: *“Carriedo dice que las primeras investigaciones sobre el incendio de Villarejo apuntan a que fue intencionado”*.

Publicado el día 19 de Marzo (Sábado) de 2005:

- Teletipo de la Agencia EFE: *“Incendios en Galicia: Diez Incendios forestales activos en tres provincias”*.

Publicado el día 20 de Marzo (Domingo) de 2005:

- La Voz de Galicia: *“Los incendiarios aprovechan la sequía para extender el fuego por Orense”*.
- El Diario Montañés: *“Galicia: 14 incendios forestales se mantienen activos”*.
- Teletipo de Europa Press: *“Al menos 15 incendios continúan activos en toda Galicia, cinco de ellos en Ourense”*.

Publicado el día 21 de Marzo (Lunes) de 2005:

- La Voz de Galicia: *“La lluvia ayuda a extinguir los fuegos que permanecían activos en Ourense”*.

- La Opinión de A Coruña: “*La lluvia facilita una tregua a la proliferación de incendios forestales*”.
- El Ideal Gallego: “*Los servicios de extinción logran apagar todos los fuegos en Galicia*”.
- Antena 3 noticias: “*Extinguidos todos los incendios que han azotado Galicia*”.
- Informativos Telecinco: “*El norte de la península sufre más de 200 incendios durante el fin de semana*”.
- ABC: “*Asturias pide ayuda a Medio Ambiente tras declararse cien incendios en un solo día*”.

IX.3. Episodio del 4 al 14 de agosto de 2006 en Galicia

De nuevo se trata de un triste episodio ya que, por desgracia, se registraron aquí también víctimas mortales. La oleada de fuegos se inició el día 4 y se cerró (oficialmente) el día 14. En la tabla IX.3.1 exponemos la tipificación de días del modelo GD con sondeo de La Coruña a las 00.00 h. y de ella parecen obtenerse resultados muy claros.

IX.3.1. Modelo GD en Galicia del 1 al 17 de agosto de 2006.

Mes	Día	e (kJ/kg)	D (kJ/kg)	Tipo	Actividad
Agosto	1	11	0	IV	Baja
Agosto	2	8	9	IV	Baja
Agosto	3	15	3	IV	Baja
Agosto	4	11	23	III	Alta
Agosto	5	5	37	I	Muy Alta
Agosto	6	6	23	III	Alta
Agosto	7	9	19	III	Alta
Agosto	8	12	13	III	Alta
Agosto	9	6	37	III	Alta
Agosto	10	8	23	III	Alta
Agosto	11	5	34	I	Muy Alta
Agosto	12	6	32	III	Alta
Agosto	13	8	29	III	Alta
Agosto	14	9	17	III	Alta
Agosto	15	8	6	IV	Baja
Agosto	16	6	6	II	Muy Baja
Agosto	17	5	5	II	Muy Baja

Se trata, en definitiva, de una nítida secuencia de días de dominio seco (tipos I y III) localizada entre antecedentes de tipo IV y consecuentes de tipos IV y II.

La situación sinóptica (figura IX.3.1) que se registró el día 4 se mantuvo prácticamente constante hasta el día 14 (figura IX.3.2). Esta situación sinóptica, que establece una cuña anticiclónica sobre el Cantábrico y que se cierra con vientos del segundo cuadrante sobre Galicia es sobradamente familiar para nosotros ya desde hace años y constituye un auténtico dipolo E-O sobre Galicia. Podría decirse que se trata de la típica situación sinóptica de fuego en Galicia.

En definitiva, pocos eventos de fuego han sido tan extraordinariamente acomodados a las condiciones meteorológicas como éste.

Figura IX.3.1. Análisis sinóptico de superficie de 4 de agosto de 2006 , 00.00 h UTC.

Figura IX.3.2. Análisis sinóptico de superficie de 14 de agosto de 2006 , 00:00 h UTC.

IX.4. Incendio del edificio Windsor del 13 febrero de 2005

El denominado “ Incendio Windsor” nos va a permitir en nuestra concepción del fuego generalizar el problema ya que, en definitiva, las condiciones meteorológicas deben resultar importantes en todo tipo de incendios. Antes de entrar en detalle, y con carácter general, hemos de señalar que toda estructura vertical es más favorable al fuego ya que éste es una dinámica esencialmente vertical. Tal incendio aconteció casi al inicio del día 13 de febrero, por lo que el radiosondeo de las 00.00 h de Madrid (Barajas) (figura IX.4.1) puede resultar muy ilustrativo. En efecto, se trata de un día tipo I con una extraordinaria sequedad en los bajos niveles; también en este caso la humedad específica parece ser constante desde el suelo hasta 850 hPa.

Si tenemos en cuenta la altitud del fuego, esto es, la de la Torre más la propia de Madrid, nos encontraremos en el entorno ligeramente por debajo del nivel de 900 hPa; pues bien, desde este nivel hasta aproximadamente 850 hPa hay una estabilidad muy débil.

Figura. IX.4.1 Potenciales el 13 de febrero 2005.00:00 h. Madrid.

En otras palabras, en pleno mes de febrero nos encontramos con un día extraordinariamente proclive al fuego, y así, el carácter de día tipo I hizo que el fuego progresara verticalmente con extraordinaria rapidez; la traza del humo (figura IX.4.2.) da una idea correcta de los hechos. El humo progresó verticalmente con fuerza y el fuego fue extraordinariamente rápido.

Figura IX.4.2. Penacho originado en el incendio del Windsor. 13 de febrero de 2005

Muchas conjeturas se hicieron en su momento comparando este incendio con el acontecido en las Torres Gemelas de Nueva York del 11 de septiembre de 2001. En el caso de Nueva York, como todos bien sabemos, el penacho de humo era absolutamente horizontal, delatando con ello la estabilidad atmosférica que había y que, por otra parte, era propia de la hora local a la que acontecía (9.00 h). De esta forma, mientras el incendio Windsor fue un incendio absolutamente limpio (los flujos de calor y contaminantes progresaron verticalmente con fuerza) el incendio del 11-S en Nueva York conllevó extraordinarios problemas de deposición de contaminantes que afectaron a la salud de muchos operarios.

Para terminar hemos de resaltar que ha habido eventos de fuego urbano que delatan un cierto sincronismo mesoescalar, lo cual, no resulta nada sorprendente en el contexto de este trabajo. Uno de tales eventos aconteció al Este de China el 15 de febrero de 2004 dónde unos grandes almacenes y un templo ardieron casi simultáneamente.

En conclusión parece oportuno estudiar un posible sincronismo de incendios urbanos y silvestres dentro de un mismo área mesoescalar. En ese sentido hemos vislumbrado una cierta coincidencia en la ocurrencia de fuego a diferentes escalas temporales. Como ejemplo presentamos en la figura IX.4.3., a escala mensual, el sincronismo observado entre los incendios urbanos en la ciudad de Salamanca y silvestres en la provincia de Salamanca en el mes de septiembre durante el periodo 1999-2004. (en anexo V datos diarios de incendios urbanos y silvestres en Salamanca).

Figura IX.4.3. Incendios urbanos y silvestres en septiembre en Salamanca. 1999-2004.

CAPÍTULO X:

PROPUESTAS DE MEJORA DEL MODELO GD

En este capítulo vamos a considerar y evaluar algunas propuestas de mejora en relación al modelo GD. El modelo GD, ahora ya considerado un modelo operativo, presenta, como todo modelo de predicción, errores en la determinación del número de incendios previsto. Si desde un punto de vista puramente estadístico los errores por defecto y por exceso pueden ser igualmente interpretables en sentido de imprecisión, desde el punto de vista operativo no pueden ser interpretados de forma similar, y así, los errores por exceso (*Over prediction* o falsas alarmas) son siempre mejor asumidos que los errores por defecto (*Under prediction*). Ello es fácilmente comprensible desde el punto de vista del establecimiento de una posible estrategia diferencial tal y como nos referimos en el capítulo III. Por ello, aquí vamos a considerar algunas posibilidades de mejora que, ya adelantamos, no van a presentar espectaculares avances. Estas propuestas se refieren a modificar algunas de las parametrizaciones o incluso variar los estratos de estudio. Hemos de meditar que si estos cambios no aportan mejores resultados puede ser una buena demostración de que el modelo GD, con las parametrizaciones y estratos considerados en su configuración inicial, resulta en sí mismo satisfactorio.

X.1. El problema de los días tipo II.

Los delicados días tipo II pueden suponer, como hemos señalado anteriormente, apreciables errores de predicción. La posibilidad de convección húmeda que se presenta en estos días, con muy diversos resultados (señalados en el capítulo IV), hace difícil la predicción de fuego. El problema radica, esencialmente, en cómo se resuelve la convección húmeda del lugar. La estadística señala que los días tipo II presentan muy baja actividad de fuego y ello viene a indicar que la resolución mayoritaria es la precipitación sobre el lugar. No obstante, hemos detectado algunos días de este tipo que han presentado una actividad de fuego superior a lo normal, de tal forma que la predicción del modelo GD puede caer en una *Under prediction* que es, sin duda, el peor error de predicción a cometer. Ciertamente no son muchos los días de este tipo pero, si de mejorar el modelo GD se trata, hay que profundizar en el estudio de este tipo de días. El hecho de que existan días tipo II con inusual elevado número de incendios vendría a significar que la resolución de la convección húmeda no ha aportado precipitación al suelo, una de las posibilidades reales analizadas en el capítulo IV. Nos encontraríamos, en este caso, con la existencia cumulonímica, precipitación intracumular correspondiente, generación de descargas eléctricas, etc, pero sin precipitación en el suelo. Este escenario suele ser denominado “tormentas secas”.

Algunos autores (Rivas et al 2001a, 2001b), demuestran que la mayor frecuencia de las descargas nube-tierra acontecen en días tipo II. Estas descargas nube-tierra pueden ser causa de numerosos incendios. Si se admite que un cumulonimbo puede producir una descarga cada 20 segundos “aproximadamente”, varios miles de rayos pueden acontecer sobre un área mesoescalar a lo largo de un día tipo II. Rorig and Ferguson (2002) sitúan en días tipo II con resolución seca muy altos niveles de riesgo de incendios. En la Península Ibérica el porcentaje de incendios debidos a las descargas es minoritario, como se señaló en el capítulo III, pero en otras zonas del planeta puede ser un porcentaje mayoritario, dado que en aquellos sitios la actividad antrópica sobre la superficie vegetal es más baja.

No existen índices de riesgo que contemplen la posibilidad específica de tormentas secas. Si los hubiera, estos índices tendrían que contemplar forzosamente los parámetros energéticos (CIN, CAPE y PEA). Profundizando en este aspecto, podemos esquematizar una tormenta seca como aquella situación en la que existe un cumulonimbo precipitante pero que la precipitación no llega al suelo. En otras palabras, un balance endo-exoenergético (CIN-CAPE) favorable a la exoenergía pero con un alto PEA en el estrato base cumular-suelo. La razón de admitir que en estos días se supera la CIN y se libera la CAPE, es que en estos días se producen descargas eléctricas y, como muy bien se sabe, las descargas eléctricas requieren del proceso de condensación. A este respecto parece generalizada la aceptación de la teoría de Lathan (Lathan 1983), que considera que la separación de cargas en la nube tormentosa requiere de las tres fases del agua. Esta separación de cargas, con el movimiento vertical intracumular, va a favorecer la generación del dipolo cumular, con la carga negativa en las proximidades de la base del cúmulo, y la carga positiva en las de su techo. Una descarga nube-tierra no es más que la aniquilación de dicho dipolo por trasvase de la carga negativa desde la base del cúmulo a la superficie del suelo. Antes de la propia descarga, el suelo bajo el cúmulo presenta una distribución neta positiva de carga con la generación de un campo eléctrico vertical ascendente que se opone al campo inicial previo a la formación del cumulonimbo. Un aspecto a matizar es que las cargas positivas del suelo tienden a desplazarse por conducción hacia arriba, haciendo que los árboles propaguen carga positiva hasta su ramaje más alto, viniéndose a comportar como auténticos pararrayos. Ante este estado de cosas es evidente que el mejor proceder será el derivado de un exhaustivo análisis del radiosondeo de la zona, con una profunda valoración de la CIN, CAPE y PEA.

En un análisis aerológico, a parte del balance entre CIN, CAPE y PEA, pueden utilizarse otros criterios para evaluar la existencia o no de precipitación:

- Altura de la base del cúmulo (LFC): sería un criterio bastante intuitivo que nos indicaría la posible existencia de precipitación. Si este nivel se encuentra muy alto la CAPE seguramente sea muy pequeña y, por lo tanto, la posibilidad de precipitación es muy pequeña (día seco). Si por el contrario este nivel se alcanza pronto, la precipitación es más probable. Importante sería considerar la altura de las montañas de la región en relación a este nivel, puesto que si las montañas son lo suficientemente altas, forzosamente puede llegarse al LFC y existir precipitación allí, sobre todo si hay una dinámica de viento horizontal.
- Directamente relacionado con el criterio anterior podríamos utilizar la altura del LCL. Cuanto más alto se alcance el LCL más alto será el LFC y menor CAPE y menos precipitación. Como nivel de referencia podríamos tomar el de 700 hPa, y si el LCL se encuentra por encima concluir que la situación es de sequedad y si el LCL se encuentra por debajo entonces la situación es húmeda. En áreas de montaña puede ser interesante conocer el LCL en relación a la altitud de la línea de cumbre para saber si existirá o no condensación o incluso precipitación si la altitud es mayor que el LFC.
- Tomando dos niveles como representativos de la columna atmosférica (850 y 700 hPa) y fijándonos en la relación entre h_{850} y h^*_{700} : La relación nos indicaría la posibilidad de que se alcance el LCL y LFC, por lo tanto, la posibilidad de existencia de una CAPE y de que salga precipitación de la base de la nube. Si $h_{850} > h^*_{700}$ la posibilidad de chubascos es muy alta porque significa que en 700 existe CAPE. Sin embargo si $h_{850} \leq h^*_{700}$ es muy poco probable que haya chubascos porque o no hay CAPE en 700 o se alcanza una CAPE ínfima a gran altura. Notar que en esta estimación no se tiene en cuenta el poder evaporante ni la CIN, sólo la existencia o no de CAPE.
- Tiempo que tarda en llegar el agua desde la base de la nube al suelo: es un parámetro directamente relacionado con la altura del LFC.

La relación del área de agua precipitable (CAPE), área de endoenergía necesaria para la formación del cúmulo (CIN) y evaporación de agua precipitable (PEA) es, a nuestro juicio, el criterio más lógico para evaluar la posibilidad o no de precipitación teniendo en cuenta todas las variables que entran en juego.

Otra posibilidad que pudiera acontecer en los días tipo II, además de la “tormenta seca”, sería que no se formara cumulonimbo por nulidad en el valor de la CAPE, o inclusive, por no existir el LFC, existiendo a su vez un alto PEA y baja estabilidad en el estrato más superficial. En tales casos estos días tipo II se asemejaría mucho en comportamiento a los días tipo I.

A efectos prácticos hemos considerado una base de datos de días tipo II (durante los veranos de 1998-2004 en Galicia) que presentan una superior actividad de fuego, pueden observarse en la tabla X.1.1

Tabla X.1.1. Días tipo II con más de 10 incendios. Periodo estival 1998-2004

Día	Tipo GD	Tipo GD del día siguiente	Nº IN
02/08/1998	II	III	129
27/07/1999	II	II	58
28/07/1999	II	I	73
03/09/1999	II	IV	23
06/09/1999	II	III	34
09/09/1999	II	I	74
19/08/2000	II	IV	88
21/08/2000	II	IV	75
24/08/2000	II	II	31
25/08/2000	II	II	30
26/08/2000	II	IV	51
03/08/2001	II	IV	23
07/08/2001	II	IV	33
26/08/2001	II	I	81
21/09/2001	II	II	49
27/08/2002	II	IV	124
14/09/2002	II	I	87
16/09/2002	II	IV	12
29/09/2002	II	II	42
30/09/2002	II	II	20
04/09/2003	II	II	45
05/09/2003	II	IV	42
21/09/2003	II	IV	113
26/09/2003	II	IV	51
07/07/2004	II	II	13
30/09/2004	II	I	36

Una cuestión preliminar se deriva del hecho de que la tipificación de días para un área mesoescalar se hace a las 00:00 horas de cada día. Pudiera ocurrir, sin duda, que un día señalado como tipo II a las 00:00 fuese de otro tipo pocas horas después. Para filtrar esta posibilidad vamos a considerar aquellos días tipo II que fueron seguidos por días del mismo tipo, siendo ello garantía de que realmente todo ese día fue genuinamente tipo II. El resultado de la filtración aparece en la tabla X.1.2.

Tabla X.1.2. Tipo II con más de 10 incendios y II al día siguiente. 1998-2004

Día	Tipo GD	Tipo GD del día siguiente	Nº incendios
27/07/1999	II	II	58
24/08/2000	II	II	31
25/08/2000	II	II	30
21/09/2001	II	II	49
29/09/2002	II	II	42
30/09/2002	II	II	20
04/09/2003	II	II	45
07/07/2004	II	II	13

En las figuras X.1.1, X.1.2, X.1.3, X.1.4, X.1.5, X.1.6, X.1.7 y X.1.8 se presentan los respectivos diagramas de potenciales en los días seleccionados durante el periodo de estudio (tabla X.1.2.). En algunos casos se presentan los niveles de condensación.

En los resultados obtenidos presentados, junto con los datos de precipitación de cuatro estaciones gallegas (tabla X.1.3), hemos observado que, en general, el valor de la CAPE es muy bajo, lo cual vendría a significar que el proceso de condensación cumular era minoritario, inclusive nulo en varios de estos días. En cuanto a la CIN podemos ver que presenta valores medios altos en valor absoluto en la mayor parte de estos días, lo que hace pensar que el mecanismo de calentamiento no se registró, pudiéndose dar perfectamente los ascensos forzados sobre ladera. Como se sabe en Galicia la mayor parte del suelo son laderas. En cuanto al PEA podemos ver que presentó siempre valores muy altos con lo que, con muy alta probabilidad la precipitación no alcanzó el suelo. En el caso del menor valor de PEA fueron a registrarse con toda lógica las mayores precipitaciones sobre Galicia.

Figura X.1.1. Diagrama S(p) del 27/7/1999. Sondeo 00:00 h La Coruña.

Figura X.1.2. Diagrama S(p) del 24/08/2000. Sondeo La Coruña 00:00 h.

Figura X.1.3. Diagrama S(p) del 25/08/2000. Sondeo La Coruña 00.00 h.

Figura X.1.4 Diagrama S(P) del 21/09/2001. Sondeo La Coruña 00:00 h.

Figura X.1.5. Diagrama S(P) del 29/09/2002. Sondeo La Coruña 00:00 h.

Figura X.1.6. Diagrama S(P) del 30/9/2002. Sondeo 00:00 h La Coruña.

Figura X.1.7. Diagrama S(P) 4/09/2003. Sondeo La Coruña 00:00 h.

Figura X.1.8. Diagrama S(P) 7/7/2004. Sondeo La Coruña 00:00 h.

Tabla X.1.3. Días tipo II con más de 10 incendios registrados y tipo II al día siguiente. Periodo 1998-2004.

Día	Tipo GD	Tipo GD del día siguiente	Nº IN	CAPE (J/kg)	[CIN] (J/kg)	PEA (J/kg)	PEA Estimada estrato superficial cuando CAPE=0 (J/kg)	P LC mm	P LU mm	P O mm	P PO mm	Desglose Tipo II Según CAPES y CIN Observadas y PEA estimadas
27/07/1999	II	II	58	0	0	-	ALTA hasta 850 hPa	0	1	0	0	II.0 PEA alta e indiferencia adiabática estrato superficial
24/08/2000	II	II	31	7,84	122	941	-	0	0	0	0	II.1
25/08/2000	II	II	30	10,78	149	857	-	0	0	0	0	II.1
21/09/2001	II	II	49	0	0	-	ALTA hasta 890 hPa	47	30	23	75	II.0 PEA alta e indiferencia adiabática estrato superficial
29/09/2002	II	II	42	5,46	103,00	530	-	0	1	0	PI	II.1
30/09/2002	II	II	20	302,10	35,10	338	-	9	1	10	38	II.1
04/09/2003	II	II	45	0	0	-	ALTA en estratos superficiales intermedios hasta los 740 hPa	0	0	0	0	II.0 PEA alta e indiferencia adiabática estrato superficial
07/07/2004	II	II	13	62,44	12,30	234	-	99	87	77	150	II.1

Los casos de CAPE positiva, PEA muy alto y con nula precipitación bien pudieran ser considerados como días de tormenta seca (II.1). Los casos de CAPE nula o ausencia de LFC, con alto PEA y baja estabilidad en estrato superficial podrían ser considerados como días inestables secos (II.0). En definitiva los días tipo II podrían presentar cualitativamente una clasificación interna con tres variedades (II.0, II.1. y II.2) a tener en cuenta en la gestión antifuego. Los primeros (II.0) vendrían a representar aquellos días que, aun siendo tipo II podrían presentar una actividad de fuego superior a lo propio de ese tipo de días. Los segundos (II.1), los días en los que acontezca tormenta seca, pero la existencia de tormentas secas no es tan relevante en sentido estadístico en el problema de la actividad de fuego en Galicia. Por último los propios días de tormenta (II.2), con chubascos asociados, son los genuinos tipo II. Pero éstos pueden presentar zonas de descenso de aire seco con lo que, en dichas zonas, la columna atmosférica presentaría propiedades de día tipo III.

En definitiva los días tipo II, que constituyen un problema muy minoritario desde el punto de vista estadístico en Galicia, deben requerir cierta minuciosidad. Para lo cual se haría necesario incluir una subrutina de análisis de parámetros CAPE, CIN y PEA en el seno cualitativo del modelo GD, y discernir los II.0, II.1 y II.2. (ver figura X.1.9). Además una buena herramienta para determinar la distribución espacial de la precipitación en los días II.2. son los modelos ARPS de alta densidad espacial que nos permitirían detectar los huecos secos en los que podrían acontecer incendios.

Estas situaciones poseen especial interés en invierno, ya que en la región Peninsular el vapor de agua está más presente por el predominio de la circulación oceánica, y eso puede influir en que nos encontremos con más días tipo II. Pero en muchos de esos días tipo II pueden tener lugar procesos convectivos del tipo II.0, definido aquí, que generan un mayor riesgo que el II.2. Además el invierno al tratarse de una época en la cual la atmósfera posee mayor dinamismo la representatividad del radiosondeo de las 00:00 h para las siguientes 24 horas es más limitada. Un ejemplo de este tipo de días lo encontramos el día 17 de marzo de 2005 en Galicia en el que la situación de la columna atmosférica era como la mostrada en la figura X.1.10. Como vemos es una situación propia de la subclase II.0., CAPE y CIN nula y un alto PEA observado en el estrato cercano a la superficie. Es un día inestable en el que se favorecen las ascensiones de aire y la precipitación no existirá a pesar de que en 850 hPa se presenta cierta humedad.

Figura X.1.9. Diagrama de Flujo de la Rutina a aplicar en los días d tipo II del Modelo GD para resolver el problema de los días inestables húmedos con riesgo de fuego.

Figura X.1.10. Diagrama S(P) 00.00 h La Coruña. Día tipo II.0 con riesgo.

A la hora de enumerar los diferentes criterios que podían ser utilizados para evaluar la posibilidad de precipitación en estos días excepcionales hablamos de la relación entre h_{850} y h^*_{700} . Se trata de un criterio que puede ser aplicado de manera más rápida que un balance energético pero posee algunas carencias. Si $h_{850} > h^*_{700}$ la posibilidad de chubascos es muy alta. Sin embargo si $h_{850} \leq h^*_{700}$ es muy poco probable que haya chubascos. Los resultados de esta relación para los ocho días de estudio han sido los presentados en la tabla X.1.4. En los resultados observamos que prácticamente todos los días estudiados poseen una posibilidad de agua precipitada apreciablemente baja excepto algún día que pudo existir potencialmente en la base de la nube. Concretamente el día 25/08/2000 la posibilidad de agua precipitable es alta.

Este criterio nos está indicando la existencia de un agua precipitable que sale de la nube pero no de la posibilidad de que ese agua precipitada llegue a la superficie. No tiene en cuenta el poder evaporante de la atmósfera que puede existir entre la nube y el suelo. Además es un criterio que mide la posibilidad de que exista CAPE, pero nada nos dice sobre su magnitud. Para tener una idea completa de todo el proceso convectivo y precipitación en superficie es necesario realizar un estudio completo teniendo en cuenta CAPE, CIN y PEA.

Tabla X.1.4. Valores de h_{850} y h^*_{700} en kJ/kg y la posibilidad de precipitación

Día	h_{850}	h^*_{700}	Posibilidad de Chubascos
27/07/1999	325	328	Baja
24/08/2000	313	316	Baja
25/08/2000	317	314	Alta
21/09/2001	320	320	Baja
29/09/2002	326	326	Baja
30/09/2002	320	322	Baja
04/09/2003	318	321	Baja
07/07/2004	306	310	Baja

En resumen, el modelo GD parece presentar buenos resultados en el transcurso del tiempo. Campañas posteriores al establecimiento del modelo no vienen sino a confirmar la bondad del modelo, de tal suerte, que pudiéndose incorporar matizaciones conceptuales como la aquí expuesta, a tener en cuenta operativamente, no perturban, por su baja incidencia, la calidad del modelo.

X.2. La Troposfera como un único estrato

Es un hecho normal que la información de radiosondeos pueda presentar algún *lack*. Si este *lack* afecta a alguno de los parámetros *input* del modelo GD, la tipificación de días no sería posible y, en consecuencia, el modelo no sería operativo ese día. En el caso en que la carencia de datos se refiera a uno de los dos niveles isobáricos tipo que requiere el modelo GD, la mejor solución sería construir dicho dato mediante un proceso de interpolación. Como se sabe, existen muchas formas de interpolación pero, sea cual sea la interpolación por la que se opte es conveniente valorar en *play back* el error en que pudiéramos incurrir.

A los efectos anteriores hemos abordado la posibilidad de considerar la troposfera como un único estrato de estudio y, en este sentido, la representación $S(p)$ tiene un carácter lineal que induce a pensar que la interpolación lineal puede ser un buen método para recuperar información ignorada (ver ejemplo en la figura X.2.1).

X.2.1. Diagrama $S(p)$ con niveles estándar del día 9 de julio de 2001 radiosondeo de La Coruña a las 00:00 h.

En relación a las curvas **h** y **h*** la interpolación no es recomendable ya que presentan alta irregularidad, especialmente **h**.

Pero si de intentar obtener una mínima información en tales circunstancias se tratara es necesario averiguar si la interpolación lineal a realizar representa adecuadamente el estado de estabilidad y humedad de la columna en lo que a riesgo de fuego se refiere. Para ello, hemos procedido a realizar las correspondientes regresiones lineales diarias de $S(p)$ para toda la troposfera en la estación de La Coruña en el periodo estival 1998-2006. (ver anexos I y XIV). Del mismo modo se ha hallado una interpolación de la **D** para toda la columna. El resultado promediado de todo ello ha sido la obtención de un “box” troposférico (1000-300 hPa) que se presenta en la tabla X.2.1.

Tabla resumen X.2.1. Box troposférico (1000-300 hPa)

Tipo de día	Denominación	$e_{inv} (\Delta P / \Delta S)$	$\bar{D}$ (kJ/kg)
I	<i>Inestable Seco</i>	>20.55	≥ 7.64
II	<i>Inestable Húmedo</i>	>20.55	<7.64
III	<i>Estable Seco</i>	≤ 20.55	≥ 7.64
IV	<i>Estable Húmedo</i>	≤ 20.55	<7.64

donde e_{inv} representa la pendiente de la recta de ajuste de $S(p)$ y $\bar{D}$ la distancia media entre **h** y **h***, para la totalidad de la columna.

La actividad de fuego en Galicia en el periodo estival 1999-2005 según la tipificación con tal criterio aparece en la tabla X.2.2.(ver anexo XIV).

Tabla X.2.2. Actividad de Fuego con criterio troposférico. Veranos 1998-2005 Galicia.

Año	DFR I	DFR II	DFR III	DFR IV
1998	157,57	31,08	115,00	46,82
1999	88,64	32,83	62,21	45,68
2000	147,33	57,74	110,00	53,00
2001	82,25	15,50	107,60	31,17

2002	118,10	66,81	87,00	44,71
2003	98,43	30,42	78,50	31,10
2004	72,17	24,63	57,79	32,96
2005	87,05	27,06	64,27	57,50
media	106,44	35,76	85,30	42,87
NDFR	0,4	0,1	0,3	0,2

Como se puede ver los resultados son correctos. En cualquier caso, insistimos que esos procesos de interpolación, especialmente en lo que **h** y **h*** se refiere, deben usarse como último recurso.

X.3. Modificación en la parametrización de las ecuaciones

El modelo GD contempla la posibilidad de un *output* predictivo que ha sido desarrollado hasta un plazo de predicción de cinco días (ver anexo IV). Este proceso de predicción requiere de una alimentación con parámetros previstos.

Para el caso de la predicción real sobre un día *d*, la ecuación era:

$$PNF(d) = \left[0.7 \cdot \frac{RNF(d-1)}{NDFR_{(d-1)}} + 0.3 \cdot \frac{RNF(d-2)}{NDFR_{(d-2)}} \right] \cdot NDFR_{(d)} \quad (X.3.1)$$

Pues bien, supongamos que la tipificación del día presente (*d*), que fue establecida a las 00.00 h., no representa correctamente el tal día *d*, por acontecer un cambio de masa con posterioridad al inicio de ese día. En tal caso, una buena corrección sería proceder al cambio de NDFR (*d*) por NDFR'(*d*), dado este por:

$$NDFR'_{(d)} = \frac{NDFR_{(d)} + NDFR_{(d+1)}}{2} \quad (X.3.2)$$

donde el NDFR_(d+1) es resultado de la predicción meteorológica.

Como puede observarse esta sustitución no afectaría al caso en el que se consolidara el tipo de día para *d+1*, lo que daría una cierta garantía de que la tipificación hecha para el

día d con datos reales a las 00.00 h es consistente. En el caso que la predicción meteorológica orientara hacia un valor menor de NDFR para el día d+1, la sustitución vendría a considerar que el día d no resulta tan efectivo al fuego, como en un principio se vaticinó con datos reales a las 00.00 h. Caso contrario sería si la predicción indica un valor mayor.

En definitiva el sentido de esta sustitución es aplanar el resultado de predicción cuantitativa en los casos en los que d+1 presente un tipo previsto distinto al tipo real del día d. Por iteración, todo lo expresado anteriormente puede ser expandido (*forward*) hasta d+5. El objetivo final es eliminar posibles disonancias, especialmente aquellas que conducen a la *Under prediction*, pero también la *Over prediction*.

X.4. Aplicabilidad espacial universal del modelo GD

Como se sabe, la superficie del planeta presenta grandes heterogeneidades, especialmente en zonas continentales. En tal sentido, resulta oportuno abordar el problema de cómo el modelo GD podría ser aplicable en cualquier territorio. Desde un punto de vista teórico, todo parecería indicar inicialmente que el modelo GD tuviera un comportamiento satisfactorio, ya que el asiento físico que conlleva es universal. En otras palabras, pensar que el acoplamiento estabilidad-humedad está asociado a la actividad de fuego no debe presentar excepciones territoriales.

El problema que se plantea es que el modelo GD presenta un “box” de parametrización con valores medios correspondientes a la zona del noroeste peninsular y, naturalmente, dichos valores medios pueden ser muy distintos para otras zonas. El significado medioambiental de que cada territorio continental requiera de unos valores medios propios vendría a ser que cada zona tiene su estado medio de la diada (**e, D**); acorde a esta diada se desarrolla la vegetación correspondiente, así como todo el material combustible del suelo. Los alejamientos del valor medio de dicha diada estarán asociados al respectivo rango de número de incendios. Si el alejamiento tiene lugar hacia una menor estabilidad y más alto déficit de saturación la actividad será superior; si por el contrario, el alejamiento de los valores medios tiene lugar hacia menor estabilidad y menor déficit de saturación, la actividad de fuego será mínima. Si fuera corroborado con suficiente fundamento el razonamiento anterior, estaríamos en condiciones de

afirmar que el modelo GD puede ser plenamente operativo en cualquier punto continental del planeta.

A los efectos anteriores en la figura X.4.1. presentamos el “box” correspondiente a la estación de radiosondeos de Madrid-Barajas según datos a las 00.00 h. del periodo estival 1998-2006 (ver anexos VII y XV).

Fig. X.4.1. Box Madrid-Barajas.

En la tabla X.4.1. presentamos los resultados de fuego para Madrid y Guadalajara (periodo estival 1999-2006) teniendo en cuenta el “box” de Madrid-Barajas.(ver anexo XV).

Tabla X.4.1. Actividad estival de fuego (Madrid-Guadalajara 1999-2006).

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1999	122	34	3,59	25	14	1,79	28	8	3,50	67	36	1,86
2000	160	36	4,44	18	12	1,50	42	15	2,80	82	29	2,83
2001	154	38	4,05	47	16	2,94	28	8	3,50	73	30	2,43
2002	142	31	4,58	39	19	2,05	16	5	3,20	105	37	2,84
2003	211	41	5,15	39	14	2,79	42	10	4,20	61	27	2,26
2004	194	39	4,97	36	10	3,60	33	7	4,71	127	36	3,53
2005	107	37	2,89	25	11	2,27	25	7	3,57	100	37	2,70
2006	117	40	2,93	32	16	2,00	10	5	2,00	57	31	1,84
Total	1207	296		261	112		224	65		672	263	
DFR (medio)			4,08			2,37			3,44			2,54
NDFR			0,33			0,19			0,28			0,20

Como puede observarse los números de incendios son muy bajos, y bien pudiera pensarse que la estadística deja de ser representativa pero, aun así, la ordenación de riesgo de fuego resulta absolutamente correcta.

X.5. Flujos dipolares: posibilidad de modelo objetivo.

En el capítulo VII hemos expuesto la clara conexión que existe entre la tipificación de días del modelo GD y la situación sinóptica correspondiente. Matizábamos allí que la actividad de fuego en las zonas periféricas peninsulares podía ser descrita en términos de flujos dipolares. Pues bien, tales flujos dipolares para la zona del noroeste peninsular podrían ser detectados a partir de un modelo objetivo, y aquí indagamos tal posibilidad.

En la figura X.5.1. presentamos una posibilidad de *grid* formada por las estaciones de La Coruña, Santander, Madrid y Lisboa que hemos ordenado numéricamente.

Figura X.5.1. Grid para la determinación de dipolos el NW peninsular.

La distribución de geopotencial (los gradientes positivos respectivos) 3-2 y 4-3 nos permitirán detectar las componentes E y S del flujo que llegue sobre la región noroeste,

esto es, las advecciones más proclives a la aparición de fuego; simétricamente los gradientes de geopotencial positivos 2-1 y 1-4 nos darán idea de las advecciones N y O, las menos proclives al fuego. En el caso de análisis de superficie, el tratamiento y razonamientos anteriores se aplican sobre el campo de presiones.

En la figura X.5.2. se presenta un ejemplo en el que el análisis objetivo muestra gradientes de presión 3-2 y 4-3 positivos, lo que delata claramente una llegada de flujo del segundo cuadrante sobre la zona.

Como caso contrario en la figura X.5.3 presentamos una situación con gradientes 1-4 positivo y nulo el 2-1, lo cual delata una circulación zonal pura sobre la costa atlántica.

Figura X.5.2. Mapa sinóptico de presión en superficie del día 15 de julio de 2004 a las 00:00 UTC.

Figura X.5.3. Mapa sinóptico de presión en superficie del 19 de agosto de 2004 a las 00:00 UTC.

Estos razonamientos pueden aplicarse, con buen resultado, a los eventos citados en el capítulo anterior.

El interés de establecer este procedimiento objetivo para la determinación de dipolos radica en que dicho tratamiento puede establecerse sobre mapas de superficie y/o altura previstos y, en este sentido, la existencia de dipolos podría ser detectada a plazo medio (5-15 días). Como ejemplo la web www.wetterzentrale.de (del servicio meteorológico alemán) nos presenta un campo de predicciones con plazos 1-15 días. Esta posibilidad predictiva es, que sepamos a día de hoy, la más extensa en rango y, en consecuencia, constituye la herramienta que a más largo plazo nos permite evaluar el riesgo de fuego sobre la zona de estudio (NW de España). Esta orientación del problema será abordada en trabajos futuros.

X.6. Refinamiento mesoescalar del modelo GD

Como último punto de estudio en esta tesis, abordamos una matización mesoescalar que se refiere al caso de describir la aparición de fuego en función de dos estaciones de

radiosondeos ubicadas simétricamente con respecto a la zona de estudio. La visualización más clara de ello podría ser el caso de Castilla y León (provincias occidentales) a partir de informaciones de las estaciones de radiosondeo de La Coruña y Madrid. En principio los resultados, al evaluar la actividad de fuego en León, Zamora y Salamanca con datos de La Coruña o Madrid, no deberían ser divergentes, pero hemos querido verificar que ello es así. En las tablas X.6.1 y X.6.2 presentamos los resultados estivales cuando han sido consideradas respectivamente como referencias la estación de radiosondeos de Madrid y La Coruña. Como pueden verse los resultados son absolutamente coherentes.

Un último refinamiento consistiría en elaborar un radiosondeo medio La Coruña-Madrid. Hemos procedido en ese sentido, en la tabla X.6.3., a la presentación de los resultados de fuego para Castilla y León. Como puede observarse los resultados son absolutamente coherentes.

Los resultados a escala diaria pueden consultarse en anexos V, VII y VIII.

Tabla X.6.1 Aparición de fuego en Castilla y León con referencia de Madrid, periodo estival 1999-2006 (parametrización GD: $e=6$ y $D=12$ kJ/kg).

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1999	602	66	9,12	6	3	2,00	87	9	9,67	35	14	2,50
2000	869	73	11,90	0	4	0,00	68	14	4,86	4	1	4,00
2001	770	74	10,41	19	8	2,38	55	5	11,00	44	5	8,80
2002	345	68	5,07	12	10	1,20	41	8	5,13	7	6	1,17
2003	529	70	7,56	10	4	2,50	76	11	6,91	28	7	4,00
2004	349	69	5,06	8	4	2,00	78	12	6,50	10	7	1,43
2005	475	64	7,42	69	13	5,31	60	10	6,00	37	5	7,40
2006	470	69	6,81	17	10	1,70	42	10	4,20	12	3	4,00
Total	4409	553		141	56		507	79		177	48	
DFR (medio)	7,92			2,14			6,78			4,16		
NDFR	0,4			0,1			0,3			0,2		

Tabla X.6.2. Aparición de fuego en Castilla y León con referencia de La Coruña, periodo estival 1998-2006 (parametrización GD: $e=6$ y $D=12$ kJ/kg).

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1998	370	26	14,23	13	4	3,25	220	28	7,86	234	34	6,88
1999	232	19	12,21	44	13	3,38	166	21	7,90	288	39	7,38
2000	226	17	13,29	73	11	6,64	286	20	14,30	356	44	8,09
2001	226	16	14,13	51	9	5,67	257	20	12,85	354	47	7,53
2002	80	11	7,27	13	9	1,44	83	20	4,15	229	52	4,40
2003	335	24	13,96	17	6	2,83	144	21	6,86	147	41	3,59
2004	93	16	5,81	16	8	2,00	131	20	6,55	205	48	4,27
2005	181	19	9,53	0	1	0,00	204	30	6,80	256	42	6,10
2006	299	31	9,65	12	7	1,71	127	26	4,88	103	28	3,68
Total	2042	179		239	68		1618	206		2172	375	
DFR (medio)			11,12			2,99			8,02			5,77
NDFR			0,4			0,1			0,3			0,2

Tabla X.6.3. Aparición de fuego en Castilla y León con referencia promedio de Madrid y La Coruña, periodo estival 1998-2006 (parametrización GD: $e=6$ y $D=12$ kJ/kg).

	Tipo I			Tipo II			Tipo III			Tipo IV		
Año	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR	f	d	DFR
1999	420	43	9,77	5	5	1,00	181	22	8,23	124	22	5,64
2000	611	50	12,22	14	7	2,00	215	21	10,24	101	14	7,21
2001	545	46	11,85	32	11	2,91	231	22	10,50	80	13	6,15
2002	277	46	6,02	3	11	0,27	73	18	4,06	52	17	3,06
2003	440	45	9,78	32	8	4,00	148	24	6,17	23	15	1,53
2004	219	43	5,09	14	6	2,33	170	26	6,54	42	17	2,47
2005	328	40	8,20	5	3	1,67	174	26	6,69	134	23	5,83
2006	398	54	7,37	12	10	1,20	116	24	4,83	15	4	3,75
Total	3238	367		117	61		1308	183		571	125	
DFR (medio)			8,79			1,92			7,16			4,46
NDFR			0,4			0,1			0,3			0,2

Por lo tanto, la gestión de la aparición del fuego en el oeste de Castilla y León puede realizarse desde información de Madrid, desde información de La Coruña, así como desde información promedio de ambas estaciones.

EPÍLOGO:

FUEGO Y CAMBIO CLIMÁTICO

Posiblemente nunca haya existido en el contexto de la física de la atmósfera un debate tan profundo y generalizado como el que actualmente tiene lugar en torno al denominado *cambio climático*. Todos los campos de investigación, referidos a los más diversos aspectos del sistema Tierra-Océano-Atmósfera están introduciendo “proyecciones” hacia el futuro en sentido del cambio climático. Parece oportuno, por tanto, que nosotros aquí valoremos el problema del fuego en una proyección similar. El esquema a seguir es claro: Si la aparición del fuego está regulada por unas particulares condiciones meteorológicas habrá que plantearse cómo éstas están proyectadas hacia el futuro. De forma más concreta si la tendencia climática futura es tal que aumente la frecuencia de días tipo I, podremos hablar de mayor actividad de fuego en el futuro, y si la tendencia hacia la preponderancia de días tipo II, estaríamos hablando de una disminución de la actividad del fuego.

No hay que olvidar por otra parte, que el problema del fuego guarda estrecha relación con la concentración de CO₂ en la baja Troposfera. La cubierta vegetal es un sumidero de CO₂ y la actividad del fuego es una fuente, por ello, el papel que juegan los incendios presenta un efecto mucho más fuerte que otros procesos antropogénicos. En otras palabras, una planta industrial puede emitir más o menos CO₂, esto es, puede ser una fuente más o menos activa, pero no afecta como sumidero al problema. Los incendios son simultáneamente activación de fuente y disminución de sumidero.

El problema ambiental del cambio climático, calentamiento global o cambio global, actualmente está siendo uno de los más considerados dentro de la opinión pública en general y de la comunidad científica en particular. La labor de los científicos ha sido, y es, conocer bien los mecanismos, procesos naturales y consecuencias involucradas en el calentamiento global, para saber qué parte es causa natural y el grado de responsabilidad del ser humano en todo ello. Sólo posteriormente al adecuado conocimiento, se podrá plantear la propuesta de soluciones en la medida de lo posible en lo que respecta a las causas antropogénicas.

Aunque existe la tendencia entre los que estudian el medio ambiente de un lenguaje reivindicativo más trascendente, nosotros lo dejaremos aparcado y nos centraremos exclusivamente en razonamientos científicos que contribuyen mejor al conocimiento del llamado cambio climático actual.

Los problemas ambientales se encuentran interconectados unos con otros de una manera directa. La deforestación y la desertización, por poner un ejemplo, se entienden como dos problemas científicamente claramente yuxtapuestos.

El cambio climático y los incendios forestales son dos de los problemas de mayor preocupación en nuestros días y suelen relacionarse en el sentido causa-efecto en diferentes ámbitos de la sociedad, pero tal relación no es planteada desde un punto de vista físico. Así se piensa en algunos sectores sociales que el aumento de temperatura causa el incremento de incendios forestales. Especialmente es muy común encontrar afirmaciones así en los medios de comunicación sin que exista una demostración fehaciente de que el fuego suceda siempre con altas temperaturas en superficie. A nuestro juicio tal relación directa es un error. Los incendios pueden acontecer con altas temperaturas pero también puede haber incendios con bajas temperaturas en superficie. Los datos así lo reflejan. Eso demuestra que la aparición del fuego no depende de forma directa de la temperatura sino de otros parámetros como los presentados en esta tesis.

Se requiere una explicación física, que de forma lógica, recoja los hechos que nos muestra la realidad de los datos. En trabajos previos ya se demostró, por parte de este grupo, que los incendios en Galicia no acontecen necesariamente sólo en episodios de altas temperaturas. En invierno también tienen lugar oleadas de fuego en esa región. Existen otros parámetros de estrato que están directamente más relacionados con el fuego que lo que puede estar la temperatura en superficie. La temperatura en superficie puede influir directamente en dichos parámetros de estrato, pero no siempre. Se ha tratado este asunto en diversas ocasiones a lo largo de esta tesis.

1. Trascendencia del cambio climático

Actualmente es cada vez más frecuente la mención del término “Cambio Climático” en distintos ámbitos de la sociedad, especialmente en los medios de comunicación. Este interés por el clima y su variabilidad viene por su influencia en el desarrollo humano y en la conservación de la biodiversidad, y de ahí ha trascendido al ámbito político. Por otra parte, por primera vez, se reconoce la influencia que el hombre puede tener en la alteración del sistema climático por la actividad industrial, deforestación, etc.

Al detectarse evidencias por amplios sectores de la comunidad científica de un aumento de la temperatura en algunos lugares de la Tierra, y de ser atribuidas en parte a la acción antrópica, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Se trata de un grupo abierto a todos los Miembros de las Naciones Unidas y de la OMM.

La función del IPCC consiste en analizar, de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente, la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático provocado por las actividades humanas, sus posibles repercusiones y las posibilidades de adaptación y atenuación del mismo. El IPCC no realiza investigaciones ni controla datos relativos al clima u otros parámetros pertinentes, sino que basa su evaluación principalmente en la literatura científica y técnica revisada y publicada.

Una de las principales actividades del IPCC es hacer una evaluación periódica de los conocimientos sobre el cambio climático. El IPCC elabora, asimismo, Informes Especiales, Documentos Técnicos e Informes Metodológicos, sobre temas en los que se consideran necesarios la información y el asesoramiento científico de forma independiente.

Cambio Climático 2001, es el Tercer informe de evaluación del IPCC 2001, que consta de un Informe de Síntesis, la Base Científica, Impactos, Adaptación, Vulnerabilidad y Mitigación. Otro de los informes de la etapa inicial fue el informe del Grupo de Trabajo I: Cambio Climático, Evaluación Científica del IPCC 1990. En este último se tratan los factores que determinan el clima mundial, los gases de efecto invernadero, entre otros temas. El más reciente es el 4º Informe de evaluación del IPCC 2007 que aborda las Base Física, Adaptaciones y Vulnerabilidad y la Mitigación, presentado durante la redacción de esta tesis.

Además la ONU ha iniciado un conjunto de Programas Internacionales genéricos y específicos que estudian los cambios para conocer y prevenir efectos. Muchos de estos programas tratan de anticiparse a los problemas en el futuro determinando posibles escenarios. Se establecen así modelos climáticos que indicarán cuales serán las

situaciones. Para elaborar esos modelos son necesarios datos climáticos sobre el clima pasado reciente, y sobre épocas históricas del pasado geológico de la Tierra (Paleoclimas). Es importante saber cuales fueron las series temporales climáticas del pasado en la Tierra. La Paleoclimatología hace uso de una serie de registros climáticos y así ha mostrado condiciones climáticas en el pasado muy diferentes que las actuales, de hecho se tiene constancia de que el clima cambia a lo largo del tiempo.

2. Los registros climáticos

A lo largo de la historia de la Tierra, el planeta ha sufrido con cierta frecuencia variaciones en el clima. Si queremos estudiar los cambios en el sistema climático o elaborar modelos de predicción del clima (escenarios futuros) está claro que necesitamos datos suficientes a cerca de la ciclicidad climática. Para ello es necesario recurrir a fuentes que aporten series temporales amplias que cumplan las periodicidades de los ciclos climáticos. Tengamos en cuenta que los datos climáticos de medición directa instrumental (temperatura, precipitación, nivel mareal) no se han estado recogiendo, como por otra parte es bastante obvio, durante tanto tiempo, y cubren además un escaso rango temporal de la historia del planeta. Como mucho en algunos lugares se prolongan hasta hace un par de siglos, por lo tanto, son insuficientes para valorar ninguna variabilidad a largo plazo. No obstante este tipo de datos sí pueden indicar tendencias de los últimos años.

Otras fuentes de información pueden ser documentos históricos agrícolas de índole arqueológica, pero son sesgados e incompletos. Por lo tanto, a lo que se ha recurrido en la ciencia ha sido al estudio de una serie de registros del pasado que han conservado de forma indirecta las variaciones del clima, alguno de ellos son:

- Corales
- Anillos de árboles (dendrología).
- Testigos de hielo
- Espeleotemas. Bandas de calcita en macizos cársticos
- Sedimentos. Concretamente los marinos son los más importantes por su gran continuidad temporal y espacial debido a la ausencia de erosión.

Con los registros de testigos de hielo antártico y de sedimentos marinos se pueden reconstruir los paleoclimas del pasado. Al mostrar variaciones en la concentración de gases como es CO_2 , determinados isótopos, o la presencia de determinados taxones biológicos, de una manera indirecta, se están indicando las épocas en las que la temperatura ascendió o disminuyó en el planeta. Así, ligeras oscilaciones en el sistema climático han quedado registradas. Los cambios en el clima producen cambios en las masas de agua oceánica influyendo en la composición de los organismos, que finalmente, se verá reflejado en el registro sedimentario muestreado en los testigos oceánicos.

En este tipo de registros se puede hallar mucha información también a cerca de incendios del pasado de la Tierra.

3. Atmósfera. Circulación General de la Atmósfera.

Es muy común asociar la ciclicidad climática únicamente a variaciones de condiciones atmosféricas, pero la verdad es que el sistema climático consta de 5 subsistemas que se interrelacionan entre sí: Atmósfera, Hidrosfera, Litosfera, Biosfera y Criosfera. De todos estos subsistemas interrelacionados destacamos dos principalmente por ser los que más pueden contribuir a una variación del clima: la atmósfera y la hidrosfera. Son los dos con más capacidad de transporte de calor del planeta.

Debido a la variación en la declinación solar existente en la superficie terrestre, por su forma esférica, y la inclinación del eje de rotación sobre el plano de la eclíptica (de la órbita), se produce un desigual balance radiativo y fuertes gradientes de temperatura del aire y del agua entre las zonas ecuatoriales y polares. La atmósfera y la hidrosfera jugarán un papel muy importante redistribuyendo el calor en el planeta y determinando así las condiciones climáticas.

Los fuertes gradientes de temperatura debidos al desequilibrio radiativo en el planeta van a dar lugar a un movimiento de masas de aire desde la superficie del ecuador hacia los polos como mecanismo de cancelación. Dicho movimiento es la denominada Circulación General de la Atmósfera (CGA) cuya estructura planetaria es tricelular. Existen tres células en cada hemisferio llamadas: Ecuatorial, Subtropical y Polar que definen zonas de descendencias y ascendencias de aire. De manera global las masas de

aire del hemisferio norte se encuentran aisladas de las masas del hemisferio sur. Podemos decir, por lo tanto, que ambos hemisferios se comportan de manera individual y aislada en lo que a circulación atmosférica se refiere. Por lo que, cambios en la circulación de un hemisferio no influyen en el otro y viceversa. Eso explica que muchas variaciones climáticas halladas en el Polo Norte no han afectado a la Antártida.

Este es el esquema ideal primario de circulación de masas de aire en el planeta Tierra como consecuencia del desigual balance radiativo existente. En él pueden localizarse geográficamente claramente las zonas de convergencia en superficie y ascensiones de aire así como las zonas de divergencia y descensos.

Entrando en detalle en una aproximación más real, podrían describirse desviaciones sobre la CGA debido al efecto Coriolis, a la heterogeneidad de la superficie terrestre y al rozamiento con la superficie de la Tierra, resultando finalmente movimientos ondulatorios que originan los anticiclones y a las borrascas.

4. Hidrosfera. Circulación Termohalina.

En el subsistema hidrosfera (representada en un 98 % por los océanos) tiene lugar un mecanismo de respuesta similar al que hemos visto en el subsistema atmósfera. Los gradientes de temperatura y de salinidad desencadenan un movimiento de masas de agua superficiales desde el ecuador hacia los polos. Esas corrientes transportan el calor en exceso y así equilibran el balance radiativo. Al llegar a los polos las corrientes se enfrían, aumenta su densidad y se hunden desplazando a otras masas de agua. Se genera así una circulación llamada Circulación Termohalina responsable de las Corrientes Oceánicas del planeta. El sistema completo de respuesta, al igual que en la atmósfera, actúa como una cinta transportadora de calor.

5. Influencia de otros subsistemas

Existen otros subsistemas que han jugado, y juegan también, un papel en los cambios en el sistema climático que se han producido en la historia de la tierra: Criosfera, Listosfera, Biosfera, etc.

La influencia de la Criosfera quedará suficientemente plasmada más adelante.

En el caso de la Litosfera, principalmente debido a razones tectónicas en el pasado, se produjeron cambios en la deriva continental cambiando la disposición de los continentes y los océanos y, por lo tanto, las Corrientes Oceánicas. No obstante en la historia reciente de la Tierra no han existido derivas importantes. De gran trascendencia fue por ejemplo la formación del istmo de Panamá hace 3.5 millones de años que cambió el régimen de corrientes marinas produciendo importantes cambios en el clima de la Tierra. Las erupciones volcánicas puntualmente han dado lugar a episodios de variación climática que han durado décadas a causa de las emisiones de gases de efecto invernadero, la reducción de la insolación y desajustes en el balance radiativo por la emisión de cenizas a la atmósfera. La formación de cordilleras es otro de los factores que han intervenido con consecuencias en la variación de los regímenes de circulación general de la atmósfera a nivel planetario. Todas y cada una han sido situaciones especiales a añadir a la ciclicidad climática de la historia de nuestro planeta.

El papel de la Biosfera es de gran importancia en el sistema climático. Las grandes superficies forestales ecuatoriales, tanto en el pasado como en el presente, poseen una función a añadir a las suyas propias, como es la del transporte de calor en la atmósfera, ya que emiten vapor de agua por evapotranspiración, que es transportado por la circulación general en forma de calor latente de condensación hasta otras latitudes. El Cinturón de selva tropical es fundamental, no sólo por la importancia biológica y ecológica de las forestas, sino también por el mantenimiento del sistema climático en la Tierra. Una eliminación de la vegetación en el Ecuador traería consecuencias a nivel planetario puesto que el calor no se transportaría con tanta eficiencia y el Ecuador se sobrecalentaría enfriándose otras zonas.

Agentes externos al sistema climático causaron importantes cambios en el clima también, como por ejemplo la caída de asteroides con consecuencias planetarias por la reducción de la insolación a causa de la emisión de partículas a la atmósfera después del impacto.

6. Ciclicidad Climática.

Las investigaciones sobre el sistema climático a lo largo del registro geológico han aumentado en los últimos años y ha revelado que el clima no sólo oscila en ciclos de decenas de miles de años según las características de la órbita terrestre (ciclicidad

orbital), también existen ciclos menores en duración (milenarios, seculares o incluso decenales) que se encuentran superpuestos a los anteriores.

Las fluctuaciones o paradas de los mecanismos de transporte de la atmósfera y la hidrosfera, normalmente asociadas con variaciones en la radiación solar que llega al planeta, estarían asociadas con cambios climáticos de cierta intensidad. Son las variaciones climáticas de tipo orbital de mayor rango, explicadas por medio de la Teoría Milankovitch. (Teoría de Milankovitch-Shackleton) (Shackleton, 1967).

Otras oscilaciones menores son debidas a fluctuaciones en la dinámica del sistema climático de la Tierra que han sucedido en la historia reciente en numerosas ocasiones, como por ejemplo los llamados eventos Heinrich y ciclos Dansgaard- Oeschger.(Bond et al 2000, Rahmstorf 2002). Sin desechar variaciones muy puntuales debidas a procesos tectónicos, erupciones volcánicas o caídas de asteroides.

Milankovitch definió unos ciclos astronómicos de radiación solar cuya periodicidad oscila entre 20.000 y 400.000 años, que están causados por la diferente incidencia de la radiación solar sobre el planeta a lo largo del tiempo (los cuales poseen una enorme correlación con ciclicidades de sedimentos de origen marino) debido a tres tipos de oscilaciones de la órbita terrestre: Excentricidad orbital, Oblicuidad del eje terrestre y Precesión de los equinocios. Mientras que la excentricidad influye en cambios en la insolación global, la oblicuidad y la precesión modifican la distribución de la radiación estacional y latitudinalmente. No hay que olvidar que la actividad solar también ha sufrido variaciones cíclicas a lo largo del tiempo y se ven reflejadas en la cantidad de radiación que llega a la tierra y, por lo tanto, en la ciclicidad climática.

En definitiva por cualquiera de esos mecanismos orbitales o por la variación en la actividad solar se altera la cantidad de energía recibida en cada estación y en cada una de las latitudes del planeta, lo que provoca que los mecanismos de respuesta de transporte de calor en la Tierra se vean afectados (corrientes marinas y circulación general de la atmósfera).

Estos cambios climáticos a escala orbital afectan al volumen de hielo en la Criosfera definiendo las épocas de glaciación. La correlación del volumen de hielo existente con

los ciclos de Milankovitch es bastante aceptable según investigaciones recogidas en diversos informes del IPCC.

En investigaciones sobre sedimentos marinos se han localizado ciclos que se corresponden bastante con los de la Teoría de Milankovitch, por lo tanto, se concluyó que la causa principal de los cambios climáticos sucedidos a lo largo del cuaternario son esas variaciones astronómicas. No obstante dicha correlación no es exacta ya que se encuentran en los registros sedimentarios respuestas más graduales, así como adelantos o retrasos con respecto a los ciclos astronómicos de la teoría. Seguramente sea debido a la influencia de los subsistemas climáticos como: la capacidad de respuesta del océano y la atmósfera, la concentración de gases invernadero, la dinámica de los casquetes de hielo, etc.

Se han encontrado en investigaciones sobre Paleoclimatología registros de eventos climáticos con periodicidad menor que los ciclos de la teoría de Milankovitch (Heinrich 1988, Dansgaard et al 1993), y son las llamadas variaciones climáticas suborbitales. Estas oscilaciones climáticas de menor rango son los denominados eventos Heinrich y Ciclos Dansgaard-Oeschger que tienen en común su escasa duración y ciclicidad. Estos ciclos ponen de manifiesto, por ejemplo, como en la zona de Atlántico Norte puede alterarse y reorganizarse el clima en corto periodo de tiempo, siglos o incluso décadas. Y estas pulsaciones climáticas de menor rango no sólo se ven durante los periodos glaciares de causa orbital sino también en periodos cálidos (Holoceno y último interglacial). La causa principal de estas oscilaciones (de escala milenaria a decenal) son las interacciones entre los diferentes subsistemas del sistema climático.

Los eventos Heinrich se habrían originado en episodios de llegada de agua dulce y descarga masiva de *iceberg* en el Atlántico Norte en momentos particularmente muy fríos, así queda patente en estudios realizados sobre sedimentos marinos: Restos lúlicos transportados por los *iceberg* a latitudes medias datados en épocas de baja actividad biológica en altas latitudes. Además son observados ciclos de menor entidad que los eventos Heinrich que se corresponden con oscilaciones térmicas bruscas y cortas, estos son los ciclos Dansgaard-Oeschger (DO). (ver figura 6.1). La gran correlación entre ambas curvas (lúlicos y actividad biológica) evidencia que se trata de diferentes respuestas al mismo proceso.

Los eventos Heinrich parecen producirse siempre al final de 3 o 4 ciclos DO sucesivos en los que el enfriamiento se incrementa progresivamente liberándose gran cantidad de *iceberg*, y los periodos cálidos son cada vez más cortos. Tras el mínimo térmico que da lugar a un evento Heinrich se produce un calentamiento brusco y se inicia de nuevo un ciclo con una fase de enfriamiento progresivo (sucesión de ciclos DO) con mínimo en un nuevo evento Heinrich, es el llamado ciclo Bond.

Lo que se produce durante la fase de enfriamiento del ciclo Bond (evento Heinrich tras sucesión de ciclos DO) es un aumento de agua dulce al Atlántico Norte que paraliza la corriente Termohalina no llegando calor desde el Ecuador. En la fase de calentamiento del ciclo Bond (Posterior a un evento Heinrich con sucesión de ciclos DO) aumenta el agua salada y la circulación oceánica se restablece calentando el Atlántico Norte. Los ciclos Bond están relacionados con la dinámica evolutiva de los casquetes de hielo de la Criosfera.

Fig 6.1. Testigo de hielo de Groenlandia (actividad biológica) y un registro de testigo oceánico situado al oeste de Irlanda (restos líticos). Dansgaard (1993).

Fuente: Colmenero 2004.

Durante un evento Heinrich el Atlántico tropical se calienta al contrario que lo que sucedía en el Atlántico Norte, y es porque al desaparecer la Corriente Termohalina se interrumpe el transporte de calor hacia el Norte.

Los ciclos DO, incluidos en el ciclo de Bond, están causados por la oscilación de la circulación de las aguas atlánticas y el transporte de calor debido a la descarga de *iceberg* desde casquetes del hemisferio norte. Durante estos ciclos la corriente Termohalina no se colapsa como en un evento Heinrich, porque no hay variaciones bruscas en la salinidad, pero se ve alterada en cuanto a la temperatura se refiere.

La periodicidad de los ciclos Bond es de 7000 años, con 6800 años de enfriamiento y 450 años de calentamiento. La periodicidad de los ciclos DO serían de 1470 años.

Se ha observado que los eventos Heinrich y ciclos DO encontrados en testigos de hielo de Groenlandia no son sincrónicos con los encontrados en la Antártida y es que cuando el hemisferio norte se calienta la Antártida se enfría y viceversa.

Teniendo en cuenta sólo esta ciclicidad natural, lo que podría estar sucediendo en nuestros días en el hemisferio norte, es que estemos en una fase de calentamiento brusco del del ciclo Bond. Durante esta fase se está produciendo un deshielo del casquete del polo norte. Al liberarse agua dulce en el Atlántico Norte la Termohalina se verá afectada y al cabo de varios cientos de años de calentamiento entraremos en una fase de enfriamiento que durará otros varios cientos de años, y así hasta desembocar en un nuevo evento Heinrich, donde la Termohalina se paralizará, con una baja térmica en el Polo Norte y altas temperaturas en el Atlántico Tropical.

Con la ciclicidad natural dentro de pocos milenios se podría finalizar en un periodo muy frío debido a la respuesta del sistema climático. Pero esto sería sin tener en cuenta el efecto antrópico.

7. El clima en la Historia humana (últimos 10.000 años).

La tendencia natural de las temperaturas ha sido ya descrita pero el ser humano, que forma parte de la biosfera, sin duda es una especie que puede jugar el papel más importante en el clima de la Tierra.

Desde que la especie humana hace acto de presencia hace 1,5 millones de años la temperatura del planeta fluctúa sin una tendencia aparente que no sea la natural durante miles de años. En los últimos milenios (ver figura 7.1) se presenta una alternancia de épocas frías y cálidas, destacando la época fría del Nuevo Dryas (Younger Dryas, hace 10.500 años) y el óptimo climático registrado en el Holoceno medio, cuyas condiciones térmicas del planeta fueron superiores a las actuales.

Figura 7.1. Evolución temperatura últimos 11.000 años. Fuente: Cambio Climático. Evaluación Científica del IPCC 1990.

El Nuevo Dryas pudo ser causado por variaciones mencionadas en la corriente Termohalina debido a la fusión de hielo en el Atlántico Norte (Ciclo DO o evento Heinrich). En el Holoceno medio existieron condiciones de mayor humedad en el Sahara y el lago Chad era del tamaño del Caspio. Las condiciones de sequedad comenzaron hace 4000 años (IPCC 1990).

Ya dentro del último milenio hay periodos cálidos como el óptimo medieval de Europa en el siglo X al XIII, incluso hay periodos fríos como la pequeña edad de hielo iniciada en torno al 1500, pero sin llegar a ser como el Nuevo Dryas.

En el siglo XIX, el incremento observado en anomalía de temperatura comienza a ser mayor de lo normal (Ver figuras 7.2 y 7.3). Parece bastante claro que el hombre puede estar contribuyendo con su actividad en la Tierra en el sistema climático, incorporando su efecto aditivo a la ciclicidad natural. No ha sido hasta la Revolución Industrial cuando la actividad antrópica ha jugado un papel definitivamente decisivo en el cambio de la temperatura planetaria.

Figura 7.2. Evolución últimos 1000 años en el Hemisferio Norte. Fuente: Cambio Climático 2001. Tercer informe de evaluación del IPCC 2001.

Figura 7.3: Anomalía de la temperatura global en la superficie continental en los últimos 150 años según diferentes autores. Fuente: Cambio Climático 2007. La Base Científica. Cuarto informe de evaluación del IPCC 2007.

8. Los incendios en el pasado

Por medio de registros del clima, como los anillos de los árboles, puede datarse la ocurrencia de un incendio en el pasado. Eso sucede porque el árbol no perece y quedan residuos en los anillos de crecimiento vegetativo. Por medio de estas técnicas se puede llegar a saber la estación en la cual sucedieron los incendios y cuales fueron las condiciones atmosféricas en las que tuvieron lugar.

Esta fuente de información de los incendios del pasado proporciona bastante precisión en la reconstrucción de eventos de fuego de los últimos 400 años o menos. Es posible saber el año e incluso la estación en la cual tuvo lugar el fuego, y espacialmente el nivel de resolución es muy alto, identificando exactamente la localización en la que aconteció. Los datos no se pueden extender más allá de la propia edad de los árboles y si queremos prolongarnos en el pasado hacen falta analizar árboles muy longevos, y son precisamente los menos abundantes.

Un resultado a destacar es que en diversas investigaciones se observó un sincronismo espacio-temporal en la aparición del fuego en el pasado. Los registros de la misma estación de fuego aparecían para la misma datación en otros bosques a varios centenares de km. (Swetnam 1990).

En el suroeste de Estados Unidos se han realizado trabajos y se ha observado un mayor desarrollo vegetativo en las estaciones de primavera y otoño cuando la influencia oceánica en la región es mayor, y por lo tanto, las precipitaciones. Los incendios vienen a coincidir con épocas secas.

Otro tipo de registro del clima útil para datar eventos de fuego en el pasado son los sedimentos pero su precisión temporal y espacial es menos precisa que en los anteriores. Las partículas de carbón dispersadas por el viento en un incendio pueden recorrer grandes distancias muy alejadas del lugar del incendio y acumularse durante mucho tiempo. Además el sedimento de carbón depositado puede ser representativo de un área muy amplia o de incendios de más de un año. Por ello más que hablar de incendios individuales se habla de intervalos o periodos de incendios.

Verardo et al (1996) hallaron en el Atlántico tropical registros marinos de episodios de incendios acontecidos durante el Pleistoceno tardío (hace unos 11.000 años, Nuevo Dryas) en áreas continentales.

Las dataciones donde se han encontrado indicios de episodios de incendios han coincidido con épocas de bajas temperaturas como los eventos de fuego de la pequeña edad de hielo existente desde el siglo XVI hasta el XIX (Swetnam 1990; Hessler et al. 2004), y los mencionados antes en la época fría del Pleistoceno tardío (Verardo and William 1996). Según la bibliografía los episodios de fuego acontecieron en épocas especialmente secas donde los regímenes de humedad en el continente se redujeron favoreciendo la aparición del fuego. Es un hecho que los incendios no están necesariamente ligados a las altas temperaturas.

9. Pasado reciente y escenarios futuros

El efecto invernadero es un proceso natural que ha tenido y tiene lugar en el planeta Tierra y permite que la temperatura media actualmente sea de aproximadamente 15° C. Consiste en la absorción de la radiación infrarroja emitida por Tierra por parte de determinados gases de la atmósfera. Uno de ellos es el CO₂ y su concentración va a condicionar la temperatura. En la historia de la Tierra la temperatura media ha variado correlacionándose con las concentraciones de CO₂. En épocas con altas concentraciones de CO₂ se observaron evidencias del aumento de la temperatura (Jones 1988).

A partir de la Revolución Industrial los niveles de CO₂, procedente de la combustión de combustibles fósiles, han aumentado, y eso se debería traducir, como ya en algunas zonas se está observando, en un aumento de la temperatura. La sociedad ha recurrido en los últimos 150 años al uso de combustibles fósiles como combustible para el transporte, maquinaria, calefacciones. Estos combustibles fósiles poseen un carbono en sus enlaces que fue fijado hace millones de años por procesos biológicos muy lentos. El tiempo de retención de ese carbono fue sin duda mayor que la velocidad a la cual se está liberando actualmente por medio de la combustión.

Es esa rápida liberación a la atmósfera del CO₂ retenido durante millones de años, la que puede variar los balances del ciclo del Carbono en la atmósfera, y si el planeta no tiene un mecanismo de respuesta regulador de las concentraciones de CO₂, todo indica

que se producirá un aumento de temperatura por efecto invernadero. Así se está registrando en las observaciones de la temperatura a lo largo del planeta (figura 9.1).

Como podemos observar, se han registrado aumentos de la temperatura en la mayoría de las localizaciones, algunas sorprendentes, como el dato del archipiélago Svalbarb cercano al Polo Norte. Por otro lado existen otros lugares donde la temperatura ha descendido como es el caso de puntos de África central, de Sudamérica o Asia.

Figura 9.1: Tendencia de las temperaturas anuales durante el periodo 1901-2000

Fuente: Cambio Climático 2001. Tercer informe de evaluación del IPCC 2001.

Existen modelos de predicción de varios escenarios posibles si la concentración de CO_2 sigue aumentando, y dan como resultado una tendencia al aumento de la temperatura media del planeta. Las limitaciones de los modelos estriban en el hecho de que no consideran toda la variabilidad climática recogida en los registros del clima de la Tierra. Admitiendo esas limitaciones en la precisión de los datos y en los modelos predictivos, la situación de calentamiento del planeta es evidente. Escenarios futuros con aumentos de CO_2 dan lugar a un aumento de la temperatura en superficie según los modelos.

Pero el CO_2 no es el único gas de efecto invernadero, además de que pueden estar participando otros factores, ajenos a los gases invernadero, en el incremento de temperatura.

10. El desarrollo como fuente de calor

Es lógico y esperable que un aumento del desarrollo se traduzca en un aumento de la temperatura en superficie. No solo por la liberación de gases invernadero a la atmósfera por medio de la contaminación, sino que ya el desarrollo en sí mismo es calor porque el número de focos de calor y de combustión aumenta.

Además hemos variado muchos las superficies, una sociedad más desarrollada posee más infraestructuras y más áreas cubiertas por asfalto y hormigón que aumentan la absorción de radiación. Debido a que esas superficies tienen mayor capacidad de absorber energía radiante que el suelo natural, emiten en consecuencia más radiación infrarroja (Ley de Kirchhoff), variando el balance radiativo y favoreciendo un calentamiento del aire cercano a la superficie. Más radiación infrarroja y más gases invernadero más calor en la atmósfera. Es el efecto hallado en muchas ciudades denominado “isla de calor”.

Una mala localización de los observatorios puede estar confundiendo este efecto de isla de calor con un calentamiento global.

11. Sumideros de CO₂

Existen sumideros naturales de CO₂ presentes en el ciclo del C que contribuyen a regular los desajustes en el balance atmosférico. Son por ejemplo, además de los océanos, que es el mayor sumidero de todos, los bosques y superficies forestales. Constituyen todos ellos una gran reserva de carbono. Se estima que más del 37 % del total de carbono almacenado en la parte terrestre de la biosfera se encuentra en los bosques boreales. La mayoría se encuentra en suelos y turberas. En total supondría un 15 % del total de carbono a nivel planetario (Kasischke et al 1995). Según Hall et al. (1997) en los últimos 7000 años el suelo de los bosques boreales ha acumulado $30 \text{ g} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{año}^{-1}$.

12. El papel de otros gases de efecto invernadero: El Vapor de agua.

El CO₂ no es el único gas con efecto invernadero, existen otros gases del mismo efecto como son el metano, los óxidos de nitrógeno, CFCs y el vapor de agua, sin olvidar el efecto opuesto producido por el albedo de las partículas aerosoles.

El metano es un gas que ha sido liberado por procesos naturales como sucede en el caso del CO₂, pero con la contaminación industrial y el aumento de superficies agrícolas anegadas (como arrozales) y ganaderas, la liberación de metano se está incrementando.

El forzamiento radiativo total es la suma del forzamiento correspondiente a los diferentes gases de efecto invernadero. Lo que se suele realizar para mayor sencillez es considerar la cantidad de CO₂ equivalente que sería necesaria para ocasionar ese forzamiento total. Es la llamada *concentración equivalente de CO₂*.

A nuestro juicio, en todo este proceso el vapor de agua desempeña una importante labor. No sabemos con total exactitud su función completa en la atmósfera, pero está claro que, de conocerlo, podríamos seguramente dar explicación a muchas cuestiones, entre ellas, algunos aspectos referidos al cambio climático. El vapor de agua es liberado por muchas industrias, pero también a su vez, grandes cantidades pasan desde las masas de agua del planeta a la atmósfera.

Debe tenerse en cuenta que el vapor de agua no sólo es gas de efecto invernadero sino que actúa como transportador de calor en la atmósfera en forma de calor latente en los procesos de evaporación y condensación. Un importante reto científico del futuro es conocer completamente el papel que verdaderamente juega el vapor de agua.

Por otra parte, la variación de la concentración de vapor de agua en la atmósfera debido a un futuro escenario hipotético de calentamiento del clima en la Tierra, puede afectar a los regímenes de precipitaciones. Áreas que antes eran húmedas pueden pasar a ser secas y viceversa. Según el informe del IPCC 1990 las anomalías de la precipitación en diferentes partes del mundo siguen tendencias muy diferentes. Mientras que en el Sahel han descendido entre 1950 y 1990, sin embargo, en los estados de la antigua U.R.S.S la tendencia al aumento es muy clara. En África oriental las variaciones no fueron significativas ni hacia un ascenso ni a un descenso.

Si el contenido de vapor de agua en el aire disminuye o aumenta, los efectos en la aparición de los incendios van a ser muy directos. Con un escenario de calentamiento las zonas donde la sequedad aumente los incendios aparecerán en un mayor grado, pero sin embargo en las zonas que se tornen más húmedas los incendios descenderán. No se

puede afirmar que un cambio climático, que implique variaciones en los contenidos de humedad, vaya a dar lugar a más incendios en términos globales. Es más, un hipotético calentamiento favorecería la evaporación de manera generalizada, aumentando la humedad del aire en balance total con lo que ello supone a efectos de descenso del riesgo de fuego.

Si sólo tenemos en cuenta dicho parámetro de humedad, aumentando el contenido de vapor de agua en el aire en balance global, los incendios descenderán (predominarán los días II y IV de GD). Sin embargo si el cambio climático fuera hacia temperaturas del planeta más bajas la evaporación no se vería favorecida de forma generalizada y el aire sería más seco (días de dominio III y I) aumentando los incendios a escala mundial, especialmente ante escenarios de baja estabilidad atmosférica.

13. Los incendios como emisores de gases de efecto invernadero

Los incendios forestales son procesos de combustión en sí mismos y, por lo tanto, liberan gran cantidad de gases y compuestos orgánicos volátiles. Entre los gases liberados hay gran cantidad de gases de efecto invernadero como CO₂, metano y vapor de agua. Centrándonos ahora en el CO₂, en el momento de un incendio, el bosque pasa de ser un sumidero a ser una fuente de CO₂.

En la siguiente tabla 13.1 se muestra una estimación del CO₂ liberado anualmente por los incendios acontecidos durante el periodo 1961-2003 en España, suponiendo que por cada hectárea existen 10 toneladas de biomasa, y que por cada 1000 toneladas de biomasa quemadas, 40 son de CO₂. Sabemos que esta equivalencia puede variar de unas masas a otras, pero globalmente asumir la proporción del 4 % es lógico.

Tabla 13.1. Estimación de emisiones según las hectáreas quemadas en España

Total hectáreas quemadas en España en el periodo 1961-2003	Media de hectáreas anuales quemadas en España	Toneladas de anuales de biomasa quemada	Toneladas de CO ₂ emitidas anualmente
6.546.233	152.238	1.522.380	60.895,19

La velocidad de liberación de CO_2 durante un incendio es mucho mayor que la velocidad a la que se ha asumido por el bosque. Si los incendios aumentasen, el ecosistema forestal desde un punto de vista global podría pasar de ser sumidero a ser fuente en balance neto, algo que sí podría contribuir al calentamiento global. Pero para desequilibrar el balance hacia más liberación de CO_2 , el fuego debería dominar grandes superficies y durante mucho tiempo. En este sentido, si eso sucediera, diríamos que los incendios provocan el cambio climático, y no el cambio climático los incendios.

14. Análisis crítico del problema

En la opinión pública se encuentra bastante extendida la idea de que el calentamiento global provoca que haya más incendios forestales. Según las investigaciones presentadas en el IPCC, el cambio climático causado por los gases de efecto invernadero de origen antropogénico, producirá en escenarios futuros, aumentos en la temperatura de la superficie terrestre. Si la aparición de más incendios estuviera directamente ligada con un aumento de la temperatura en superficie entonces podríamos decir que el cambio climático producirá más incendios. Pero no es lo que se ha observado. La aparición del fuego a escala estacional, no guarda relación directa con la variación de temperatura invierno-verano, por ejemplo.

En la presente tesis son presentadas las condiciones bajo las cuales el fuego hace acto de presencia, y vemos que condiciones relacionadas con el estado de la columna vertical de la atmósfera son más determinantes que condicionamientos superficiales de temperatura. Sólo si el cambio climático futuro diera lugar a una aumento de las condiciones verticales de fuego (inestabilidad y sequedad) podríamos decir que aumentarían los incendios.

Respecto a lo que en un principio se piensa desde algunos sectores, en escenarios futuros (de aumento de temperatura) puede acontecer, desde un punto de vista de las condiciones atmosféricas, una disminución de los incendios. La humedad atmosférica aumentará por incremento de la evaporación (aparición de días húmedos). Si a ello además se une que el calentamiento global dé lugar a una atmósfera más inestable, las condiciones del fuego serían mínimas.

Las cuestiones que debemos plantearnos en la relación calentamiento global e incendios son: ¿El cambio climático dará lugar a una columna más seca o más húmeda?. ¿En los escenarios futuros la estabilidad aumenta o disminuye?. En definitiva, ¿cómo influirá el calentamiento global en las condiciones favorecedoras del fuego?.

Hasta ahora la respuesta científica a estos interrogantes indica que el riesgo de fuego disminuirá ante escenarios futuros de aumento térmico en superficie, dados los condicionantes atmosféricos que influyen en la actividad de fuego que se han estudiado en esta tesis. Más temperatura más humedad en el aire, más temperatura más inestabilidad superficial, por lo tanto, mínimo riesgo de fuego.

Pero sin embargo no podemos ignorar el hecho observado de que los incendios a nivel mundial están aumentando. En Galicia, por ejemplo, la tendencia del aumento del número de incendios estivales es bastante clara en los últimos 20 años (figura 14.1). La conclusión fácil a primera vista, es achacar ese aumento al incremento de temperatura observado, pero es una afirmación que requeriría una buena explicación física para los incendios registrados en invierno a temperaturas bajas. Los datos de incendios estudiados no revelan que un aumento de temperatura necesariamente traiga consigo un aumento de los incendios (máximo secundario al final del invierno en Galicia).

Figura 14.1. Incendios estivales acontecidos en Galicia en el periodo 1988-2005.

Existen otras razones por las cuales el número de incendios es lógico que aumente en los últimos años. La sociedad cada vez es más desarrollada, y por lo tanto, con más focos susceptibles de calor y de ignición, a ello se le une una mayor convivencia con las masas de interfaz, por la intrusión del urbanismo en el bosque, y por otro lado, el bosque está cada vez más abandonado, y esa pasividad de la cubierta vegetal aumenta el contenido de combustibles. Todo ello facilita que los incendios tiendan a aumentar.

Parte de la comunidad científica ha demostrado que la temperatura de la superficie del planeta tiende al aumento con respecto a los siglos anteriores. Ese aumento de temperatura se mantiene en los diferentes escenarios hipotéticos de futuro presentados por algunos grupos científicos. Tales aumentos, de ser así, tendrían consecuencias negativas en algunos subsistemas que no entramos a valorar como: el aumento del nivel de los océanos, desertificación, inundaciones, pérdida de biodiversidad, etc. Pero en nuestra opinión los incendios no deben tender a aumentar a causa del incremento de temperatura augurado.

Otra cosa bien distinta es que si los incendios aumentasen considerablemente debido a otras razones (desarrollo), entonces ellos mismos sí podrían contribuir al cambio climático como fuentes de emisión de gases de efecto invernadero.

Por ello, la mitigación de este fenómeno del fuego, sobre todo en latitudes medias, se hace indispensable para la lucha contra el cambio global.

CONCLUSIONES

Los incendios son un fenómeno a tener en cuenta en la problemática ambiental de nuestros días, así como en escenarios futuros. Se hace por lo tanto indispensable esclarecer algunas cuestiones esenciales en el conocimiento de la aparición espacio-temporal del fuego que permitan ordenar y abordar el fenómeno en sus justos términos. A lo largo de esta tesis ha sido estudiado el fenómeno de los incendios desde diversos puntos de vista, haciendo especial hincapié en los aspectos físico-atmosféricos, y han sido extraídas las siguientes conclusiones:

1. Partiendo de la idea física de que un incendio debe responder a criterios físicos sobre combustión abierta, los condicionamientos meteorológicos parecen claros en el problema.
2. El modelo GD viene a objetivar la asociación atmósfera-fuego en términos de estabilidad y sequedad. En lo que al modelo GD se refiere la realidad posterior en la ocurrencia de fuego no viene sino a confirmar su calidad predictiva. Este hecho constituye la mejor validación del modelo.
3. Nuevos aspectos teóricos, relacionados con la estructura de la columna atmosférica, han sido abordados de forma inédita en este trabajo. Tal es el caso de la determinación del Poder Evaporante de la Atmósfera, determinación precisa de Niveles de Condensación en Diagramas de Potenciales, etc.
4. Todo lo anterior ha sido enfocado a minimizar los errores de predicción del modelo GD, especialmente en lo que se refiere a los días tipo II, en los que el error podría ser menos asumible (*Under Prediction*).
5. De tales valoraciones concluimos que la representación más cómoda y coherente es el diagrama de potenciales de la columna. En concreto la Energía Estática Húmeda (**h**) cobra un sentido fundamental.
6. Desde un punto de vista de dinámica vertical atmosférica es admitido por nosotros el hecho del acoplamiento fuego-atmósfera. En este sentido el propio fuego puede inestabilizar la columna. Este aspecto cobra especial interés ante situaciones de columna poco estable pudiendo dar lugar a procesos de

comportamiento severo de fuego, con grandes alturas de llama. Así, novedosamente en esta tesis, han sido definidos teóricamente: El Nivel de Penetración en la Atmósfera y la Variación de la Aceleración ascendente en un estrato de la columna (“Supertiro”).

7. En un sentido marcadamente dinámico, hemos considerado aquellas situaciones sinópticas que establecen un reparto diferencial de fuego en la Península Ibérica. Son los denominados dipolos, y han sido descritos por nosotros en formas subjetiva y objetiva. Las grandes oleadas de fuego a nivel planetario vienen acomodadas a tal efecto dipolar.
8. En un sentido operativo hemos discutido cómo debe ser un índice de riesgo de aparición de fuego. En tal sentido hemos realizado estudios comparativos del modelo GD con otros índices conocidos universalmente (Haines y FWI).
9. De forma generalizada, hemos demostrado que los índices de riesgo de fuego expresados matemáticamente en forma funcional, presentan muy confusos resultados. La conmutatividad matemática no se corresponde con la conmutatividad física.
10. En sentido complementario ha sido estudiada la aplicabilidad de diversos índices meteorológicos (KI, TTI, SI, etc) en la identificación del riesgo de fuego, realizando también estudios comparativos con el modelo GD. Su utilidad queda limitada a determinadas situaciones que deben ser consideradas en sus justos términos.
11. Fenómenos asociados a otras escalas (NAO, ENSO, etc) presentan una incidencia sobre el problema no apreciable en todos los casos. Así, bajos valores del Índice ONI (ENSO) parecen estar asociados a una más alta aparición de fuego en el NW peninsular.
12. Hemos valorado el modelo GD para orografías continentales y marítimas resultando de ello que el modelo requiere parametrizaciones particulares, esto es, locales, en el caso continental.

13. La conclusión anterior cobra un sentido medioambiental claro: La cubierta vegetal, más particularmente su sensibilidad al fuego, está absolutamente acomodada a la parametrización local, tanto de la estabilidad como de la sequedad.
14. Pero el problema del fuego no queda restringido en su estudio a aspectos puramente físicos. Es por ello que hemos analizado las normativas vigentes en la materia y las metodologías en la gestión en los últimos tiempos.
15. A su vez han sido incluidos estudios sobre la fitosociología referidos a las series de vegetación y cubierta vegetal en general.
16. Pero en definitiva, la gran cuestión que se plantea es tratar de probar que el fenómeno del fuego, lejos de ser un proceso azaroso, resulta ser un proceso clasificable y ordenable. Esto resulta de excepcional importancia porque, probada la tesis, el hecho del fuego pasa a ser un estricto problema científico. La demanda social de explicaciones ante la ocurrencia del fuego nos ha obligado a esclarecer científicamente algunos eventos, que por tristes razones, han calado en la sociedad.
17. En otro sentido, sólo la explicación científica de los hechos permitirá hacer valoraciones de futuro. Como aspecto más conocido, el denominado cambio climático, que proyecta escenarios futuros más calientes, no debería ser causa de incremento del riesgo; por el contrario, la paleoclimatología indica que las grandes oleadas de fuego acontecieron en periodos fríos y, consecuentemente, secos.

Reflexión final del autor:

Finalmente, haciendo referencia a futuras aplicaciones, diremos que la tipificación del modelo GD, y las mejoras expuestas aquí que explican el problema del fuego, pueden ser aplicadas para ordenar otros eventos de carácter medioambiental tales como: fenómenos de tiempo severo (tormentas), concentración de partículas y gases contaminantes (polen, partículas respirables, etc), nieblas, riesgo de caída de rayos, etc.

BIBLIOGRAFÍA

Albano, E.V., 1994: Critical behaviour of a forest fire model with immune trees. *J.Phys. A: Math. Gen.* **27**.

Albers, S.C.; McGinley, J.A.; Birkenheuer, D.L. & J.R. Smart., 1996: The Local Analysis and Prediction System (LAPs): Analyses of clouds, precipitation and temperature. *Weather and Forecasting*, **11 (3)**, 273-287.

Alcaraz Ariza, F., 1987: *La Vegetación de España*. Editores: Rivas-Martínez S. y Peinado Lorca M. Universidad de Alcalá de Henares.

Alexander, M.E., 1982a: Diurnal adjustment table for the Fine Fuel Moisture Code. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Northern *Forest Research Centre, Edmonton, Alberta. Forest Management*. Note **17**. 3 p.

Alexander, M.E. , 1982b: Calculating spring Drought Code starting values in the Prairie Provinces and Northwest Territories. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Northern Forest Research Centre, Edmonton, Alberta. *Forest Management* Note **12**. 4 p.

Alexander, M.E., 1983: Tables for determining spring Drought Code starting values in west-central and northern Canada. Environment Canada. Canadian Forestry Service Northern Forest Research Centre, Edmonton, Alberta. *Forest Management* Note **19**. 8 p.

Alexander, M.E.; Lawson, B.D.; Stocks, B.J.; Van Wagner, C.E. (Listed in alphabetical order)., 1984a: User guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System: rate of spread relationships. *Interim edition. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Fire Danger Group*. 73 p. + supplements, (1st Printing - July 1984; Revision & 2nd Printing - Sept. 1984].

Alexander, M.E.; Lee, B.S.; Lee C.Y., 1984b: Hourly calculation of the Fine Fuel Moisture Code, Initial Spread Index, and Fire Weather Index with the Texas Instruments model 59 hand-held calculator. Agriculture Canada, Canadian Forestry Service, Northern Forest Research Centre, Edmonton, Alberta. *Study NOR-5-191 File Report* No. **7**. 17 p.

Alexander, M.E. ,1985: Bibliography of wildfire case histories and studies. *Environment Canada, Canadian Forestry Service, Northern Forestry Research centre, Edmonton, Alberta, Study Nor-5-191, File Report* No.**4**.

Alexander, M.E., De Groot, W. J., 1988: Fire behavior in jack-pine stands as related to the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System. *Government of Canada, Canadian Forestry Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta*. Poster (with text).

Alexander, M.E.; Stocks, B.J.; Wotton, B.M.; Flannigan, M.D. & J.B. Todd, 1998: The International Crown Fire Modelling Experiment: An overview and progress report. Preprints, *Second Conference on Fire and Forest Meteorology*, Phoenix, AZ, American Meteorological Society, 20-23.

Al-Rawi K. R.; J. L. Casanova; A. Romo; E. M. Louakfaoui, 2002: Integrated Fire Evolution Monitoring System (IFEMS) for monitoring spatial-temporal behaviour of multiple fire phenomena *International Journal of Remote Sensing*.V.23. pp 1967-1983.

Amiro, B.D.; MacPherson, J.I. & R.L. Desjardins, 1999: BOREAS flight measurements of forest-fire effects on carbon dioxide and energy fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, **96**, 199-208.

Amiro, B.D.; MacPherson, J.I.; Desjardins, R.L.; Chen, J.M. & J. Liu, 2003: Post-fire carbon dioxide fluxes in the western Canadian boreal forest: evidence from towers, aircraft and remote sensing. *Agricultural and Forest Meteorology*, **115**, 91-107.

Anderson, H.E., 1970: Forest fuel ignibility. *Fire Tech.* **6**, 312-319.

Andrews, P.L. & L.S. Bradshaw, 1991: Use of meteorological information for fire management in USA. *Météorologie et Incendies de Forêts*. D. Rijks and W. M. Ciesla, Eds., WMO-FAO 325-333.

Andrews, P.L.; Loftsgaarden, D.O. & L.S. Bradshaw, 2003: Evaluation of fire danger rating indexes using logistic regression and percentile analysis. *International Journal of Wildland Fire*, **12**, 213-226.

Arakawa, A. & W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **31**, 674-701.

Arnaldos, J., 2004: *Manual de Ingeniería Básica para la Prevención y Extinción de Incendios Forestales*. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona. 414 pp.

Asensio, M.I. and Ferragut, L. 2002: On a wildland fire model with radiation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **54**: 137-157.

Ballesteros, J., Pérez Adán, J. et al., 1997: *Sociedad y medio ambiente*. Editorial Trotta. Madrid. 400 pp.

Beall, H W., 1939: Tables for estimating the tracer index from early afternoon readings and table for diurnal hazard variation. *Can. Dep. Mines & Resources, Dominion Forest Serv. Suppl. To Forest Fire Res. Note* **5**. 20p.

Beall, H W., 1947: Research in the measurement of forest fire danger. *Paper presented to Fifth Brit. Empire For. Conf. Reprinted in 1967 as Inf. REP. FF-X-8, Can. Dep. For. Rural Develop. Forest Fire Res. Ins.* 9 p.

Beall, H W., 1948: Forest Fire Danger tables (provisional), 2nd edition revised. *Can. Dep. Mines & Resources, Dominion Forest Serv. Suppl. To Forest Fire Res. Note* **12**. 73p.

Betts, A.K., Ball, J.H., Barr, A.G., Black, T.A., McCaughey, J.H, Viterbo, P., 2006: Assessing land-surface-atmosphere coupling in the ERA-40 reanalysis with boreal forest data. *Agricultural and Forest meteorology*. **140**, 365-382.

Blackmarr, W.H., 1972: Moisture content influences ignitability of slash pine litter. *USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, N.C. Research Note* **SB-173**. 7 p.

Blanco A., 1981: *Avances sobre la investigación en bioclimatología*. Consejo superior de investigaciones científicas. Centro de Edafología y biología aplicada. Salamanca. ISBN: 84-00-05043-6.

Blanco A., 1985: *Avances sobre la investigación en bioclimatología*. Consejo superior de investigaciones científicas. Centro de Edafología y biología aplicada. Salamanca. Ediciones Universidad de Salamanca. ISBN: 84-7481-351-4.

Blaney, HF. Y Criddle, W.D. 1962: Determining Consumptive use and irrigation water requirements. *Tech. Bull. 1275. U.S. Dpt. Of Agri. Washington. DC*. **59**.

Bluestein, 1993: *Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes*. Oxford University Press. New York.

Bojariu R, Gimeno L., 2004: *Predecibilidad y modelización numérica de la Oscilación del Atlántico Norte*. En “*La Oscilación del Atlántico Norte y su influencia sobre la Península Ibérica y Canarias*”. 79-106. ISBN: 84-95780-15-1.

Bond, G.C., Showers, W., Elliot, M., Lotti, R., Hajdas, I., Bonani, G. y Johnson, S., 2000: The North Atlantic's 1-2 kyr climate rhythm: relation to Heinrich Events, Dansgaard/Oeschger Cycles and the Little Ice Age. En: *Mechanisms of global climate change at millennial time scales* (P.U. Clark, R.S. Webb y L.D. Keigwin, eds.), *Geophysical Monograph series, American Geophysical Union, Washington D.C.*, **112**, 35-58.

Branch Forestry., 1957: Forest fire danger tables, 1956. *can. Dep. Northern Aff. Nat. Resources, For. Br. Issued separately for following regions: Newfoundland, New Brunswick, Ontario, Manitoba, Alberta East Slope*. 14 p.

Brotak, E.A.; Reifsnyder, W.E., 1977: An Investigation of the Synoptic Situations Associated with Major Wildland Fires. *Journal of Applied Meteorology*, **16** (9), 867-870.

Brotak, E.A ,1977. *Meteorological conditions associated with major wildfires*, ph.D. Dissertation. Yale University. New Haven. Conn 183 pp.

Brotak, E.A., 1980: A comparison of the meteorological conditions associated with major wildland fires in the United States, Canada and Australia. *Proc. Sixth Nat. Conf. On Fire and Forest Meteorology, Seattle, Soc. Amer. For.* 66-69.

Brotak, E.A., 1993: Low level weather conditions preceding major wildfires. *U.S. department of Agriculture Forest Service. Fire Management Notes.* 53-54, 23-26.

Brown, B.G. & Murphy, A.H., 1987: Quantification of Uncertainty in Fire-Weather Forecasts: Some Results of Operational and Experimental Forecasting Programs. *Weather and Forecasting*, **2 (9)**, 190-204.

Brutsaert, W. And Stricker, 1979: An advection –aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration . *Water Resour.Res.*,**15**:443-450.

Burgan, R.E.; Klaver, R.W. & J.M. Klaver, 1998: Fuel models and fire potential from satellite and surface observations. *International Journal of Wildland Fire*, **8**, 159-170.

Byram, G.M. & G.M. Jemison, 1943: Solar radiation and forest fuel moisture. *Journal of Agricultural Research*, **67 (4)**, 149-176.

Byram, G.M., 1954: Atmospheric conditions related to blow-up fires. *U.S. Forest Service, Southeast Forest Experiment Station Paper No.35*.

Byram, G.M., 1959a: *Combustion of forest fuels*. Chapter 3 in K.P. Davis, ed. *Forest Fire: Control and use*. McGraw-Hill. New York.

Byram, G.M., 1959b: *Forest Fire behaviour*. In ‘ *Forest fire: control and use*’ (Ed. KP. Davis) pp 90-123. Mc Gram-Hill. New York.

Calvo, A., Garmendia, J.: Fórmula general para el cálculo de la evaporación. *Revista Geofísica*. N° **117-118**, Madrid 1971. págs.107-116.

Cambio Climático y Medio Ambiente. 1989: Compilación XX Jornadas de la AME. Gipuzcoako Kutxa Kultur Fundazioa. ISBN: 84-505-9505-3.

Canadian Forestry Service.,1970: Canadian Forest Fire Weather Index. *Can. Dep. Fish. Forest., Can For. Serv.* 25 p.

Canadian Forestry Service., 1971: Guides to initiate a prescribed burning program. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Pacific Forest Research Centre Victoria, British Columbia *Canadian Forest Fire Behavior Systems Suppl. BC-I. I.*

Canadian Forestry Service.,1976: Canadian Forest Fire Weather Index Tables. *Environ. Can., Can For. Serv. For. Tech. Rep.* **13**. 63 p.

Canadian Forestry Service.,1978: Canadian Forest Fire Weather Index Tables. *Environ. Can., Can For. Serv. For. Tech. Rep.* **25**. 40 p.

Canadian Forestry Service., 1984: Tables for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Fourth edition. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Ottawa, Ontario. *Forestry Technical Report* **25**. 48 p.

Carlson, J.D. & R.E. Burgan., 2003: Review of users' needs in operational fire danger estimation: the Oklahoma example. *International Journal of Remote Sensing*, **24** (8), 1601-1620.

Carlson, J.D.; Burgan, R.E. & J.R. Greenfield, 2000: The Oklahoma Fire Danger Model: An operational tool for mesoscale fire danger rating in Oklahoma. *International Journal of Wildland Fire*, **11**, 183-191

Carrega, P., 1987: Une formule simple pour l'estimation du risque d'incendies de forest dans les Alpes-Maritimes. *Bulletin de la Commission Météorologique des Alpes-Maritimes* .Nice.

Carrega, P., 1988: Une formule ameliorée pour l'estimation du risque d'incendies de forest dans les Alpes-Maritimes. *Revue d'analyse spatiale quantitative et appliquee*. N° **24**. Nice.

Carrega, P., Wybo J.L., 1989: Climatologie et Systeme-Expert dans la lutte contre les incendies de foret. *Asociación Internacional de Climatologie. MeteoFrance*. Vol.1 , pp. 235-240.

Carrega, P., 1991a: Quelques considerations sur le regime des vents a Nice. *Bulletin de la Commission Météorologique des Alpes-Maritimes* .pp. 36-39.

Carrega, P., 1991b: A meteorological index of forest FIRE hazard in mediterranean France. *International Journal of Wildland Fire*, **1** (2), pp. 79-86.

Caselles, V.; Coll, C.; Rubio, E.; Sospedra, F.; Valor, E., Micó, E., 1996: La medida de la temperatura y de la emisividad desde satélites: estado actual y perspectivas futuras. *Teledetección: Usos y Aplicaciones*. Ed. Servicio de Publicaciones, Universidad de Valladolid. Pp. 487-492.

Castro, F.X., Tudela, 2002: Live fine fuel moisture evolution and death fine fuel production in *Rosmarinus officinalis*. *IV International Conference on Forest Fire Research*.Cohimbra. D. X. Viegas (Ed.).

Castro, F.X.; Tudela, A. & M.T. Sebastià, 2003: Modeling moisture content in shrubs to predict fire risk in Catalonia (Spain). *Agricultural and Forest Meteorology*, **116**, 49-59. Elsevier Science. ISSN 0168-1923. DOI: 10.1016/S0168.

Castro, F.X.; Tudela, A. Gabriel,E. Montserrat, D. Canyameres, E. Segarra M., 2006: Evolution of live fuel moisture in mediterranean forest. *V International Conference on Forest Fire Research Forest. Ecology and Management*. D. X. Viegas (Ed.). V **234**. Supplement 1.

Charney, J.G., 1948: On the scale of atmospheric motions. *Geofys. Publik.* **17** (2), 1-17.

Chunmei, X., Yousuff Hussaini, M. Cunningham, P., Rodman, R. Linn and Scott L. Goodrick., 2003: Numerical study of effects of atmosphere temperature profile on wildfire behaviour. *Paper J2.3 in Proceeding of the 5th Symposium on Fire and Forest Meteorology*. 17-20 November 2003, Orlando, Florida. American Meteorological Society, Boston, M.A.

Clar, S, Drossel B, and Schwabl F.,1996: Forest fires other examples of self-organized critically. *J.Phys.: Condens. Matter.* **8**, 6803-6824.

Clark, T.L.; Jenkins, M.A.; Coen, J. & D. Packman, 1996: A Coupled Atmosphere-Fire Model: Convective Feedback on Fire-Line Dynamics. *Journal of Applied Meteorology*, **35** (6), 875-901

Clark, T.L., Radke, L., Coen, J., Middleton, D., 1999: Analysis of Small-Scale Convective Dynamics in a Crown Fire Using Infrared Video Camera Imagery. *Journal of Applied Meteorology*, **38**, 1441-1420.

CLIF, 1997: Libro Rojo de la Coordinación. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid.

CLIF, 1997: Libro Rojo de la Prevención. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid.

Cohen, J.D. & J.E. Deeming, 1985: The National Fire Danger Rating System: basic equations. *USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-82*, Berkeley, California, 16 p.

Colle, B.A., Westrick, K.J. and Mass C.F.,1999: Evaluation of the MM5 and Eta-10 precipitation forecast over the Pacific Northwest during the cool season. *Wea. Forecasting*, **14**, 137-154.

Colmenero, E. 2004 (Tesis doctoral) *Respuesta de las Asociaciones de Cocolitofóridos a los Cambios Climáticos del Cuaternario Final*. Departamento de Geología-Área de Paleontología. Universidad de Salamanca.

Compendio de Meteorología. *Publicación de la Organización Meteorológica Mundial* n° 634. Vol.1. Versión en Español.1974. ISBN: 92-63-30364-9.

Cruz, M.G.; Alexander, M.E. & R.H. Wakimoto, 2003: Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America. *International Journal of Wildland Fire*, **12**, 39-50.

Cunningham, A.A., and Martell, D.L., 1973: A stochastic model for occurrence of man-caused forest fires. *Can. J. For. Res.* **3** : 282-287.

Da Camara CC, Mendes MA, Trigo RM, 2004: Tipos de circulación atmosférica y su influencia en el régimen de precipitaciones en Portugal. En *La Oscilación del Atlántico Norte y su influencia sobre la Península Ibérica y Canarias*. 107-134. ISBN: 84-95780-15-1

Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjörnsdottir, A.E., Jouzel, J. y Bond, G., 1993: Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, **364**, 218-220.

Darkow, G.L., 1968: The total energy environment of severe storms. *J.Appl. Meteor*, **7**, pp 199-205

Deeming, J.; Burgan, R.; Cohen, J., 1977: The National Fire Danger Rating System-1978. *Gen. Tech. Rep. INT-39*.

Delabraze, P. & J. Ch. Valette, 1977: Étude de l'inflammabilité et de la combustibilité. *Consultation technique FAO sur les incendies de forêts en pays méditerranéens*.

Delgado Martín L., García Díez A., Rivas soriano L., García Díez E. L., 1997: Meteorology and Forest Fires: Conditions for Ignition and Conditions for Development. *Journal of Applied Meteorology*, **36 (6)**, 705-710.

Del Río González, S., 2005: *Itinera Geobotánica: El Cambio climático y su influencia en la vegetación de Castilla y León, España. Mapas*. Asociación Española de Fitosociología. Universidad de León. CD nº 16.

Dennis, A. Fraser, M., Anderson, S., Allen, D., 2002: Air pollutant emissions associated with forest, grassland, and agricultural burning in Texas. *Atmospheric Environment*, **36**, 3779-3792.

Domínguez Martín, S., Simal Pierna C., y E.L. García Díez., 2006a: El fuego como problema meteorológico. En *Acta de resúmenes IV CiFyQA*. ISBN: 84-611-0875-2. Cáceres. pp 50-51.

Domínguez Martín, S., Simal Pierna C., y E.L. García Díez., 2006b: Fires during 2005 in Spain: A forest Fire in Guadalajara and an urban Fire in Windsor building Madrid). *Forest Ecology and Management*. V **234**. Supplement 1.

Donn, W.L., 1978: *Meteorología*. Editorial Reverté. Barcelona.

Drouet, J.C., 1980: Article sur la prevision des risques et les modes de propagation. *Revue technique du feu*.

Eagan, R. C.; Hobbs, P.V.; Radke, L.F., 1974: Measurements of Cloud Condensation Nuclei and Cloud Droplet Size Distributions in the Vicinity of Forest Fires. *Journal of Applied Meteorology*, **13 (8)**, 553-557.

Eichenberger W., 1987: *Meteorologie. Versión en Español: Meteorología para Aviadores*. Ed. Paraninfo. Madrid. ISBN: 84-283-1090-4.

Elosmani M., 1992: Utilices pour la prevision du risque de danger de feux de forets. *Reunión técnica sur l'information météorologique et les incendies de forêts*. Rabat. Genève, .p 215-216.

Emanuel, 1994: *Atmospheric convection*. Oxford University Press. New York. USA.

Engisch, R.L.; Walker, J.D., 1971: PDP-8L version of Simard's Fire Weather Index Program. *Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa Forest Exp. Sta., Intern. Rep. PS-23*. 10 p.

Esteban-Parra MJ, Pozo-Vázquez D, Castro-Díez Y, Trigo RM, 2003: NAO influence on maximum and minimum temperature of the Iberian Peninsula. *En Proceedings 14th Symposium on Global Change and Climate variation* . American Meteorological Society, U.S.A.

Ferguson, S.A., 1998: Real-time mesoscale model forecasts for fire and smoke management. *Second Symposium on Fire and Forest Meteorology, 11-16 January 1998, Phoenix, AZ. American Meteorological Society*. 161-164.

Fernandes, P.M., 2001: Fire spring prediction in shrubs fuels in Portugal. *For. Ecol. Manag.*, **144**, 67-74.

Flannigan , M.D. and C.E. Van Wagner, 1983: A study of the rotation of components of the Fire weather Index to monthly provincial area burned buy wildfire in Canada, 1953-80. *Environ. Can., Can. For. Serv., Petawa Nat. For. Inst., Inf. Rep. PI-X.25*, 65 pp.

Flannigan, M.D.; Harrington, J.B. 1988: A study of the relation of meteorological variables to monthly provincial area burned by wildfire in Canada. (1953-1980). *Journal of Applied Meteorology*, **27**, 441-452.

Fleming, R.A., Candau J.N. and McAlpine, R. 2002 Landscape-scale analysis of interactions between insect defoliation and forest fire in central Canada. *Climatic Change*. **55**: 251-272.

Fosberg, M.A., 1971: Climatological influence on dead fuel moisture: a theorethical analysis. *Forest Science*.

Furman R.W., 1982: The Effectiveness of Weather Forecast in Decision Making: An example. *Journal of Applied Meteorology*, **21 (4)**, 532-536.

George, J. J., 1960: *Weather Forecasting for Aeronautics*. New York: Academic Press, 673 pp.

Galway, J.G. 1956: The lifted index as a predictor of latent instability. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **37**, 528-529.

Gallego D, García R., 2004: Efecto de la Oscilación del Atlántico Norte en la distribución de sistemas sinópticos en el Atlántico Subtropical. *En "La Oscilación del Atlántico Norte y su influencia sobre la Península Ibérica y Canarias"*. 159-177. ISBN: 84-95780-15-1

García Díez , E.L., A Alcalá and J. Garmendia, 1987: Meso-scale convective phenomena. *First International Meeting on Agriculture and Weather Modification*. University of León ,Spain.

García Díez , E.L., Labajo, J.L., Alcalá, A. and Labajo, A., 1988: Prediction of convection over Spain. *Proceedings 7th Meteosat scientific user's meeting*, Madrid. Instituto Nacional de Meteorología. SIN 1011-3932.

García Díez E. L., Labajo Salazar J. L., de Pablo Dávila F., 1993: Some Meteorological Conditions associated with Forest Fires in Galicia (Spain). *International Journal of Biometeorology*, **37**, 194-199.

García Díez E. L., Rivas Soriano L., de Pablo Dávila F., García Díez A., 1994a: An Objective Model for the Daily Outbreak of Forest Fires Based on Meteorological Considerations. *Journal of Applied Meteorology*, **33**, 519-526.

García Díez E. L., Rivas Soriano L., de Pablo Dávila F., García Díez A., 1994b: Objective Method for the Daily Prediction of the Number of Forest Fires. *Proc. 2nd International Conference on Forest Fire Research. University of Coimbra (Portugal)*, **(II)**, 759-765.

García Díez A., García Díez E. L., 1995a: Predicción del Número de Incendios Forestales Diarios como Resultado de la Interacción de las Series Temporales Tiempo Pasado-Tiempo Presente. *Actas del XXII Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa*, Sevilla (Spain): 653-656.

García Díez A., García Díez E.L., 1995b: Predicción a Varios Días del Número de Incendios Forestales Diarios. *Comunicación presentada en la IX Reunión ASEPELT-España*. Santiago de Compostela. (1995).

García Díez A., Rivas Soriano L., de Pablo Dávila F., Delgado Martín L., García Díez E. L., 1995c: A Forecast Model for the Daily Number of Forest Fires: Spatio-Temporal Considerations. *Proc. III International Congress on Energy, Environment and Technological Innovation*. UCV Caracas (Venezuela), **3**, 440-448.

García Díez A., Rivas Soriano L., García Díez E. L., 1996a: Medium-Range Forecasting for the Number of Daily Forest Fires. *Journal of Applied Meteorology*, **35**, 725-732.

García Díez A., Rivas Soriano L., de Pablo Dávila F., García Díez E. L., 1996b: Spatial Validity of a Forecast Model for the Daily Number of Forest Fires: Statistical Analysis. *International Journal of Biometeorology*, **39**, 148-150.

García Díez, A.; Rivas Soriano, L.; de Pablo Dávila, F.; García Díez, E.L., 1996c: Statistical Analysis for the Spatial Validity of a Model to Forecast the Daily Number of Forest Fires. *International Journal of Biometeorology*, **39**, 148-150.

García Díez, A., García Díez E. L., 1997: Toma de Decisiones Basada en un Modelo de Predicción del Número de Incendios Forestales Diarios. *Investigación Agraria: Economía*, **12 (1, 2, 3)**, 17-30.

García Díez, E. L., Rivas Soriano L., de Pablo Dávila F., García Díez A., 1999: Prediction of the Daily Number of Forest Fires. *International Journal of Wildland Fire*, **9 (3)**, 207-211.

García R, Gallego D, Macías A, 2004: La Oscilación del Atlántico Norte en tiempos históricos. Reconstrucción y validación. En "*La Oscilación del Atlántico Norte y su influencia sobre la Península Ibérica y Canarias*". 55-68. ISBN: 84-95780-15-1

García N.O., Gimeno L, de la Torre L, Nieto R, Añel JA, 2005: North Atlantic Oscillation (NAO) and precipitation in Galicia (Spain). *Atmósfera*, 25-32.

Gimeno L, García R, Trigo RM, de la Torre L (Eds), 2004: *La Oscilación del Atlántico Norte y su influencia sobre la Península Ibérica y Canarias*. Aica Ediciones, 231p, ISBN: 84-95780-15-1

Gisborne, H.T., 1931: A five year record of lightning storms and forest fires. *Monthly Weather Review*, **59(4)**, 139-149

Grassberger, P., 1993: On a self-organized critical forest-fire model. *J. Phys, A: Math, Gen.* **26**, 2081-2089.

Haines, D.A., Main, W.A., Frost, J.S. and Simard, A.J., 1983: Fire-danger rating and wildfire occurrence in the north-eastern United States. *Forest Science*.**29**:679-696.

Haines, D. A., 1988: A Lower Atmosphere Severity Index for Wildland Fires. *National Weather Digest* ,**13 (2)**, 23-27.

Hall, F.G.; Knapp, D.E. & K.F. Huemmerich, 1997: Physically based classification and satellite mapping of biophysical characteristics in the Southern Boreal Forests. *Journal of Geophysical Research*, **102, D24 (29)**, 567-580.

Hann, W.J. & D.L. Bunnell, 2001: Fire and land management planning and implementation across multiple scales. *International Journal of Wildland Fire*, **10**, 389-403

Harrington, J.B.; Flannigan, M.D.; Van Wagner, C.E., 1983: A study of the relations of components of the Fire Weather Index to monthly provincial area burned by wildfire in Canada 1953-80. Can. For. Serv., Petawawa Nat. For. Ins., *Inf. Rep.* **PI-X-25**. 65 p.

Heilman, W.E., Bian, X., Charney, J.J. Potter, B.E., 2003: Combining the Haines Index and turbulent kinetic energy for fire weather predictions. AMS Symposium on Fire and Forest Meteorology. Vol. 5 (np).

Heinrich, H., 1988: Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research*, **29**, 142-152.

Hernández E, 2004: Oscilación del Atlántico Norte: fundamentos. En “*La Oscilación del Atlántico Norte y su influencia sobre la Península Ibérica y Canarias*”. 19-33. ISBN: 84-95780-15-1

Hess S.L., 1959: *Introduction to Theoretical Meteorology*. ISBN:03-03-005745-0.Holt, Rinehart and Winston. New York. USA.

Hessl, A.E., D. McKenzie, and R. Schellhaas., 2004: Drought and Pacific Decadal Oscillation linked to fire occurrence in the inland Pacific Northwest. *Ecological Applications* **4(2)**:425–442.

Hoadley, J.L.; Westrick, K.; Ferguson, S.A.; Goodrick, S.L; Bradshaw, L. & P. Werth, 2004: The Effect of Model Resolution in Predicting Meteorological Parameters Used in Fire Danger Rating. *Journal of Applied Meteorology*, **43 (10)**, 1333-1347.

Holton J.R.,1990: *Introducción a la Meteorología Dinámica*. Departamento de Ciencias de la Atmósfera. Universidad de Washington. Seattle. Washington. USA. Versión en Español Ed. Instituto Nacional de Meteorología. 2ª Ed. ISBN: 84-7837-052-8.

Hooper A.H. 1975. Upper-air sounding studies. *Technical Note N° 140. World Meteorological Organization. Volume I*: 1-95.

Hoskins, B.J. and Draghici, I., 1977: The forcing of ageostrophic motion according to the semi-geostrophic equations and in an isentropic coordinate model. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1859-5867.

Hurrell J.W.,1995: Decadal trends in the north Atlantic oscillation: regional temperature and precipitation. *Science*, **269**, 676-679.

Hurrell JW 1996 Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere temperature. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 665-668.

Hurrell JW, Van Loon H., 1997: Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation, *Clim. Change*, **36**, 301-326.

Hurrell JW, Kushnir Y, Ottersen G, Visbeck M (Eds), 2003: The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact. *Geophysical Monograph Series*, **134**, 279p.

Huschke, R.E., 1959 (Ed.): *Glossary of Meteorology*, 3rd edition, American Meteorological Society, Boston, Massachusetts. 638 pp.

IPCC, 1990: *Cambio Climático: Evaluación científica del IPCC*. J. T. Houghton, GJ. Jenkins and JJ Ephraumus. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, Versión española a cargo del INM, xi + 394 págs.

IPCC, 1990: *Cambio Climático: Estrategias de respuesta del IPCC*. DC. Covelo. Istlan Press, Washington, Verisión española a acrgo del INM, xi+257.

IPCC, 1996: *Cambio Climático 1995: La ciencia del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo I al Segundo informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. [J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg y K. Maskell (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE.UU., 572 págs.

IPCC. 2001: *Cambio climático 2001: La base científica* J. T. Houghton, Y Ding, D.J. Griggs, M. Nouguer, P.J. van der Linden and D. Xiaosu. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, Versión en español. pp 944.

IPCC. 2007: *Cambio climático 2007: "The Physical Science Basis"*. Working Group I Report. Hervé Le Treut (France), Richard Somerville (USA).

Iribarne J.V and Godson W.L. 1973. *Atmospheric Thermodynamics*. D, Reidel Publishing Company. Dordrecht-Holland/Boston-USA. P 222.

Iribarne J.V and Cho H.R. 1980. *Atmospheric Physics*. D, Reidel Publishing Company. Dordrecht-Holland/Boston-USA/London-England ISBN 90-277-1033-3. P 212.

Isaev, A.S., Korovin, G.N., Bartalev, S.A., Ershov D.V., Janetos, A. Kasischke, E.S., Shugart H.H., French N.H.F., Orlick B.E. and Murphy, T.L.,2002: Using remote sensing to asses russian fire carbon emissions. *Climatic Change*. **55**. 235-249.

Ivanov, N.N , 1954: On Determining the Evaporability values. *Izvestija of the All-Union Geogr. Soc.*86, n°2.

Jansá Clar A., 1988: *Notas sobre análisis meteorológico mesoescalar en niveles atmosféricos bajos*. INM Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid, p.71.

Jenkins, M.A., 2002: An examination of the sensitivity of numerically simulated wildfires to low-level atmospheric stability and moisture, and the consequences for the Haines Index. *International Journal and Wildland fire*, **11**, 213-232.

Jenkins, M.A., 2004: Investigating the Haines Index using parcel model theory. *International Journal of Wildland Fire*, **13**, 297-309.

Jones, P.D., 1988: Hemispheric surface air temperature variations: recent trebds and an update to 1987. *J. Clim.*, **1**, 654-660.

Jones PD, Jonsson T, Wheeler D., 1997: Extension to the North Atlantic Oscillation using instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland. *Int. J. Climatol.*, **17**, 1433-1450.

Kasischke, E.S.; Christensen, N.L.Jr. & B.J. Stocks, 1995: Fire, Global Warming and the Carbon Balance of Boreal Forests. *Ecological Applications*, **5** (2), 437-451.

Kasischke, E.S.; Bergen, K.; Fennimore, R.; Sotelo, F.; Stephens, G.; Janetos, A. & H. H. Shugart, 1999: Satellite Imagery Gives Clear Picture of Russia's Boreal Forest Fires. *EOS Transactions*, **80**, 141-147

Kato, S., Pochanart, P., Hirokawa, J. Yoshizumi, K., Akimoto, A., Ozaki, Y., Obi, K, Katsumo, T, Streets, D.G. Minko, N.P., 2002: The influence of siberian forest fires on carbon monoxide concentrations at Happo, Japan. *Atmospheric Environment*, **36**, 385-390.

Kauffman, J.B., Cummings, D-L. Ward, D.E., 1998: Fire in the Brazilian Amazon. 2. Biomass, nutrient pools and losses in cattle pastures. *Ecología*. **113**: 415-427.

Kean, W.A. 1975. A PDP-8L program for calculating the Fire Weather index. *Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa Forest Exp. Sta., Inf. Rep. PS-X-57*. 12 p.
Kiill, A.D. and Mac Tavish, J.S., 1962: Forest fire danger tables: District of Mackenzie, Northwest Territories. *Can. Dep. For., Forest Res. Br.* 12 p.

Kearney, M.J., 2002: Compact directed percolation with modified boundary rules: a forest fire model. *J. Phys. A: Math. Gen.* **35**, L421-L425.

Keetch, J.J. & J.M. Byram, 1968: A drought index for forest fire control. *USDA Forest Service Research Paper*, **SE-38**, 1-32. USDA Forest Service Southeast Experiment Station, Asheville, North Carolina, 32 p.

Kiil, A. D. Miyagawa, R.S. ; Quintilio, D., 1977: Calibration and performance of the Canadian FIRE Weather Index in Alberta. *Can. For. Serv., Northern Forest Res. Center. Inf. Rep. NOR-X-173*. 45p.

Kitzberger, T., T. W. Swetnam, and T. T. Veblen., 2001: Inter-hemispheric synchrony of forest fires and the El Nino-Southern Oscillation. *Global Ecology and Biogeography* **10** (3): 315-326.

Kohler, M.A. y Parmele, L.H., 1967: water. *Reour. Res.* **3**: 996-1005.

Kourtz, P.H., 1980: A calculator program for the Canadian Forest Fire Weather Index (magnetic card version) *Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa Nat. For. Inst., Inf. Rep. PI-X-3*. 10 p.

Labajo, J.L., García, E., Izquierdo M.J., 1991: Factores Meteorológicos asociados a incendios forestales en la zona Avila, Cáceres y Salamanca. *Revista de la real Academia de Ciencia Exactas, Físicas y Naturales*. Tomo **LXXXV**, C1.

Latham, D., 1983: LLAFFS – A lightning-locating and fire-forecasting system. *Res. Pap. INT-315*. Ogen, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 44 p.

Lawson, B.D., 1972: An interpretive guide to the Canadian Forest Fire Behavior System. Can. For. Serv., *Pacific Forest Res. Center, Inf. Rep. BCP-3-72*. 17 p.

Lawson, B.D., 1977: Fire Weather Index - the basis for fire danger rating in British Columbia. Canadian Fisheries and Environment Canada. Canadian Forestry Service, Pacific Forest Research Centre, Victoria, *B.C. Report BC-P-17*. 24 p.

Ledesma M., Baleriola G., 1997: *Meteorología aplicada a la aviación*. Editorial Paraninfo. Madrid.

Ledesma Jimeno. M., 2000: *Climatología y meteorología Agrícola*. Thomson Editores. Madrid.

Linn, R.R., 1997: Transport model for prediction of wildfire behavior. *Los Alamos National Laboratory, Scientific Report LA13334-T*.

Linn, R.R., Reisner, J.M., Colman, J.J., Winterkamp, J., 2002: Studying wildfire behaviour using FIRETEC. *Int. J. Wildland Fire* **11**, 223-246.

Linn, R.R., Cunningham, P., 2005: Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere-fire model: Basic fire behavior and dependence on wind speed. *J. of Geophysical Research-Atmospheres* **110 (D13)**: D13107.

Linn, R.R., Winterkamp, J. Canfield, J. Sauer, J. Colman, J. Reisner., 2006: Versatility of FIRETEC, a physics-based wildfire model. *V International Conference on Forest Fire Research. D. X. Viegas (Ed.)*.

Loreto, V., Vespignani, A., and Zapperi, S., 1996: Renormalization scheme for forest-fire models. *J.Phys. A: Math. Gen.* **29**. 2981-3004.

Lord, S.J. and Arakawa, A., 1980: Interaction of a Cumulus Cloud Ensemble with the large-Scale Environment. Part II. *Journal of Atmospheric Sciences*, **37**, 2677-2692.

Mac Tavish, J. S., 1965: Forest fire danger tables: British Columbia Coast. *Can. Dep. For. Publication* 1099.20 p.

Martell, D.L., 1976: The use of historical data to predict forest fire occurrence. *Ontario Ministry of Natural Resources, Forest Fire Control Branch, Toronto. Information Report IR-3*. 19 p.

Martell D.L., Otukol, S., Stocks B.J., 1987. A logistic model for predicting daily people-caused forest fires occurrence in Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, **17**, 394-401.

Mass, C.F., Ovens, D., Westrick, K.J. and Colle B.A., 2002: Does increasing horizontal resolution produce more skilful forecast?. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 407-430.

McAlpine, R.S., 1987: Two BASIC programs for fire danger and fire behavior computations. Government of Canada, Canadian Forestry Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta, *Forest Management Note* **43**. 3 p.

McArthur, A.G., 1967: Fire behavior in eucalypt forest. Australia Forest. *Timber Bureau, Forest Res.Inst. Canberra. Leaflet*. **107**. 36 p.

Mc Arthur, A.G. ,1996: Weather and Grassland Fire Behavior. Commonwealth of Australia. Department of National Development. *Forestry and Timber Bureau. Leaflet Number* **100**, Canberra. Australian Capital.

Medina Isabel. M., 1984: *Teoría de la Predicción Meteorológica*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid. ISBN: 84-500-9767-3.

Merrill, D.F.; Alexander, M.E. (editors)., 1987: Glossary of forest fire management terms. Fourth edition. National Resource Council Canada, Canadian Comm. Forest Management, Ottawa, *Ontario. Publication NRCC No.* 26516.

Meteorología y climatología Ibéricas.1989: Actas de las XVII Jornadas de la AME. Ediciones Universidad de Salamanca. ISBN:84-7481-519-3.

Miller, R. C., 1967: Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Military Weather Warning Center. *AWS Tech. Rep.* **200** (revised), 170 pp. [Available from Headquarters, Air Force Weather Agency, Scott AFB, IL 62225.]

Ministerio de Medio Ambiente, 2001: *Los incendios forestales en España. Decenio 1991-2000*. DGCN, Madrid, 50 pp.

Moncrieff, M. W., and M. J. Miller, 1976: The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **102**, 373–394.

Morton F. I., 1971: Catchment evaporation and potential evaporation further development of a climatologic relationship. *Journal of Hydrology*. **12**: 81-99

Morton F. I., 1975: Estimating evaporation and transpiration from climatological observations. *Journal of Appl. of Meteorology*. **14**: 488-497.

Morton F. I., 1978: Estimating evapotranspiration from potential evaporation: practicality of an iconoclastic approach. *Journal of Hydrology*. **38**: 1-32.

Muraro, S.J., 1968: A modular approach to a revised national fire danger rating system. In Contributions on the development of a national fire danger rating system. Can. For. Serv. Pacific Forest Res. *Centre. Inf. Rep.* **BC-X-37**. 9p.

Muraro, S. J.; Russel R.N.; Lawson, B.D., 1969: Development of diurnal adjustments table for the Fine Fuel Moisture Code. Can. For. Serv., Pacific Fores Res. Centre. Inf. Rep. **BC-X-46**. 13p.

Muraro, S.J.; Lawson, B.D., 1970: Prediction of duff moisture distribution for prescribed burning. Canadian Department of Fisheries and Forests, Canadian Forestry Service, Pacific Forest Research Centre, Victoria, *British Columbia Information Report BC-X-46*. 23 p.

Nelson, R.M.Jr. & C.W. Atkins, 1986: Flame characteristics of wind-driven surface fires. *Canadian Journal of Forest Research*, **16**, 1293-1300.

Nelson, R.M. 1993 Byran's derivation of the energy criterion for forest and wildland fires. *International Journal of Wildland Fire* **3**. 131-138.

Nelson, R.M. Jr., 1994: Stability and entrainment effects on convection above wildfires. In "Proceedings of the Twelfth Conference on Fire and Forest Meteorology, Society of American Foresters". Jekyll Island, GA. Pp. 519-528.

Nelson, R.M. Jr., 2000: Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. *Canadian Journal of Forest Research*, **30**, 1071-1087.

Nelson, R.M., 2003: Power of fire-a thermodynamic analysis. *International Journal of Wildland Fire*. **12**. 51-65.

Nesterov, V.G., 1939: The nature of forest fires and how to deal with them. The All-Union Inst. Of Sci. Res. In Forest Manag. Ref. VNIikh, Moscow (English Version: Forecasting for Forest Fire Service, *WMO Technical Note*, No. **42**, 23-25.

Nikleva, S.; Parent L.E., 1971: Calculation of fire danger indices by computer. *Can. Dep. Environ., Atmos. Environ. Serv. Tech. Mem.* **TEC757**. 7 p.

Nikleva, S., 1975: Atmospheric Environment Service Fire Weather Program for British Columbia. *Can. Dep. Environ., Atmos. Environ. Serv. (Pacific region)*. 30 p.

Ohtsuki, T. And Keyes, T., 1986: Baised percolation: forest fires with wind. *J. Phys. A: Math. Gen.* **19**, L281-L287.

Orieux A., 1979: Conditions météorologiques et incendies de forets en region méditerranéenne. *Météorologie Nationale, Paris, N.T. n°8, Section XXIV*, 14 p.

Orlanski, I., 1975: A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **56**, 527-530.

Osborn TJ, Briffa KR, Tett SFB, Jones PD, Trigo RM., 1998: Evaluation of the North Atlantic Oscillation as simulated by a climate model. *Climate Dyn.*, **15**, 685-702.

Palmieri S., Cozzi R., 1983: Il Ruolo della Meterologia nella Prevenzione e Controllo degli Incendi Boschivi. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, **XLIII (4)**, 271-277.

Paul, P.M., 1970: FIRE weather forecasting for the Maritime Provinces (1964-70). *Can. For. Serv. , Maritimes Forest Res. Centre. Inf. Rep.* **M-X-22**. 79 p.

Paul, P.M. Mac Tavish, J.S., 1965: Forest fire danger tables: British Columbia-Cariboo. *Can. Dep. For. Publication* 1101. 18 p.

Penman, H.L., 1948: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London*, **A(193)**. 120-145.

Penman, H.L., 1963: Vegetation and Hydrology. *Tech. Communication. n° 13. Publ. Commonwealth. A.B.F. Rogyal Bucks.* England.

Peppler, R. A., 1988: A review of static stability indices and related thermodynamic parameters. *Illinois State Water Survey Misc. Publ.* **104**, 87 pp. [Available from Illinois State Water Survey, Champaign, IL 61820.]

Pielke, R., 1984. *Mesoscale Meteorological Modeling*, 1st edition. Academic Press, New York.

Potter, BE., 2001: How and why does the Haines Index work? Energy and dynamic considerations. In 'proceedings of the 4th symposium on fire and forest meteorology, American Meteorological Society, Los Angeles, CA'. pp 247-253.

Potter, BE., Martin, Jonathan E. 2001: Accuracy of 24-and48-hour forecast of Haines Index. *National Weather Digest.* **25 (3,4)**: 38-46.

Potter, B.E., 2002: A dynamics based view of atmosphere-fire interactions. *International Journal of Wildland Fire*, **11**, 247-255.

Potter, BE, Goodrick, SL, Brown T.J. 2003: Development of a statistical validation methodology for fire weather indices (2003-5FIRE) *AMS Symposium on Fire and Forest Meteorology.* **Vol 5** .

Pouliot, L., 1974: Prevision de meteorologie forestiere au Québec. *Environ. Can., Serv. Can. For, Ins. Ersch. Feux de foret. Rapp. D'inf.* **FF-X-49**. 33 p.

Pouliot, L., 1991: Forecasting Fire Weather Indices, *Quebec Weather Center:* Quebec.

Pozo-Vázquez D, Tovar-Pescador J, Gámiz-Fortis SR, Esteban-Parra MJ, Castro-Díez Y., 2004: NAO and solar radiation variability in the European North Atlantic region. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, DOI: 10.1029/2003GL018502.

Prieto L, García R, Hernández E, del Teso T, Díaz J., 2004: Temperaturas extremas de Madrid y la Oscilación del Atlántico Norte. En "La Oscilación del Atlántico Norte y su influencia sobre la Península Ibérica y Canarias". 179-194. ISBN: 84-95780-15-1.

Quian B, Corte-Real J, Xu H., 2000: Is the North Atlantic Oscillation the most important atmospheric pattern for precipitation in Europe? *J. Geophys. Res.*, **105**, 11901-11910.

Radojevic, M., 2003: Chemistry of Forest Fires and regional Hazewith Emphasis on Southeast Asia. *Pure appl. geophys.* **160**, 157-187.

Rahmstorf, S., 2002: Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature*, **419**, 207-214.

Rajora, O.P., Pluhar, S.A., 2003: Genetic diversity impacts of forest fires, forest harvesting and alternative reforestation practices in black spruce (*Picea mariana*). *Theor. Appl. Genet.* **106**: 1203-1212.

Reifsnnyder W.E., 1977: A fire rating system for the Mediterranean region. *FAO/UNESCO Technical Consultation on Forest Fires in the Mediterranean Region. Forestry Dept.*, 9 p.

Ribeiro L.M., Viegas D.X. and Miguel Batalha. 2006. Assessment of fire retardant efficiency. *Forest Ecology and Management*. V **234**. Supplement 1.

Riera, P. & J. Mogas, 2004: Evaluation of a risk reduction in forest fires in a Mediterranean region. *Forest Policy and Economics*, **6**, 521-528.

Rivas-Martínez S., Díaz T.E., Fernández González F., Izco J., Loidi J., Lousa M., and Penas A., 2002: *Itinera Geobotánica: Vascular Plant Communities of Spain and Portugal*. *Asociación Española de Fitosociología*. Universidad de León. Volumen **15**.

Rivas-Martínez, S.; Penas, A. & T. E. Díez, 2004: *Mapa biogeográfico de Europa*. Servicio Cartográfico de la Universidad de León.

Rivas-Martínez, S.; Penas, A. & T. E. Díez, 2004: *Mapa de bioclimas de Europa*. Servicio Cartográfico de la Universidad de León.

Rivas-Martínez, S.; Penas, A. & T. E. Díez, 2004: *Mapa de cinturones termoclimáticos de Europa*. Servicio Cartográfico de la Universidad de León.

Rivas Soriano L.J. and E.L. García Díez, 1993: On an energetic Index for local instability. *Atmósfera*, **6**, pp.127-134.

Rivas Soriano L.J., García Díez E.L. and De Pablo F., 1994: Generalized Static Energy and Its Conservation. *Journal of Atmospheric Sciences*, **51**, nº 22, 3281-3285.

Rivas Soriano L. J., De Pablo F. and García Díez E. L., 2001a: Cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula: 1992-1994. *J. Geophys. Res.*, **106**, D11, 11891-11901.

Rivas Soriano L. J., De Pablo F. and García Díez E. L., 2001b: Relationship between convective precipitation and cloud-to-ground lightning in the Iberian Peninsula. *Monthly Weather Review*, **129**, 2998-3003.

Rivas Soriano, L.J.; De Pablo Dávila, F. and E.L. García Díez, 2001c: Meteorological and geo-orographical relationships with lightning activity in Castilla-León (Spain). *Meteorol. Appl.* **8**, 169-175.

Rodrigo FS, Esteban-Parra MJ, Pozo-Vázquez D, Castro-Díez Y., 2000: Rainfall variability in southern Spain on decadal to centennial time scales. *Int. J. Climatol.*, **20**, 721-732.

Rodríguez-Puebla C, Encinas AH, Sáenz J., 2001: Winter precipitation over the Iberian Peninsula and its relationship to circulation indices. *Hydrology and Earth System Sciences*, **5 (2)**, 233-244.

Rogers JC., 1997: North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of northern Europe. *J. Climate*, **10**, 1635-1647.

Rorig M. L., Ferguson S. A., 2002: The 2000 Fire Season: Lightning-Caused Fires. *Journal of Applied Meteorology*, **41 (7)**, 786-791.

Rothermel, R.C., 1972: A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. *Research Paper Int-115*, Ogden, Utah, 40 pp.

Rothermel, R.C., 1983: How to Predict the Spread Rate and Intensity of Forest and Range Fires. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. *General Technical Report INT-143*.

Rothermel R.C., Burgan, R.E., 1984: BEHAVE: Fire behaviour prediction and fuel modelling system. Fuel subsystem. U.S. Department of Agriculture. Forest Service General. Intermountain Forest and Range Experiment Station. *Technical Report INT-167*. Ogden, UT 84401.

Rothermel, R.C., Wilson, R.A., Morris, G.A. & Sackett, S.S., 1986: Modeling moisture content of fine dead wildlands fuels: Inputs to the behave fire prediction system. USDA Forest Service. Intermountain research station. *Research paper. INT-359*.

Russell J. and Hakan G., 1997 : Influence of components of the advection-aridity approach on evapotranspiration estimation. *Journal of Hidrology*. **199**. 3-12.

Russell-Smith, J., Whitehead, P.J., Williams, R.J. and Flannigan M., 2003: Fire and savanna landscapes in northern Australia: regional lessons and global challenges. *International Journal and Wildland Fire*. **12**, v-ix.

Saastamoinen, J.J. and Taipale, R., 2000: Propagation of the Ignition Front in Beds of Wood Particles. *Combustion and Flame*. **123**: 214-226.

Sánchez Lorenzo A., Martín Vide J., Calbó Angrill J. Cernocky T., 2005: Aproximación a la influencia de la NAO en la España peninsular y Baleares. *I Congreso Cambio Climático Agricultura y Medio Ambiente*. Valladolid. 2005.

Schroeder, Mark J., 1964: Synoptic weather types associated with critical fire weather . *Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley*, 492 pp.

Seco, J y Garmendia, J., 1970: Nueva fórmula para el cálculo de la evaporación. *Rev. de Geof.*, nº **29**, pp. 49-72.

Shackleton, N.J. ,1967: Oxygen isotope analysis and Pleistocene temperatures re-assessed. *Nature*, **215**, 15-17.

Shoenberg, F.P., Peng, R., and Woods, J., 2003: On a distribution of wildfire sizes. *Environmetrics*. **14**, 583-592.

Showalter, A.K., 1947: A stability index for forecasting thunderstorms. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **34**, 250-252.

Showalter, A. K., 1953: A stability index for thunderstorm forecasting. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **34**, 250–252.

Silvani, X. y F Morandini. 2006. Intrusive measurement system for fire experiments at field scale. *Forest Ecology and Management*. V **234**. Supplement 1.

Simal Pierna C., Domínguez Martín, S. y E.L. García Díez.,2006a: Mesoescala e incendios forestales. *En Acta de resúmenes IV CiFyQA*. ISBN: 84-611-0875-2. Cáceres. pp 89-90.

Simal Pierna C., Domínguez Martín, S., y E.L. García Díez. 2006b. Synoptic versus objective meteorological estimations. *Forest Ecology and Management*. V **234**. Supplement 1.

Simal Pierna C., Domínguez Martín, S., y E.L. García Díez., 2006c: Validation of the GD model in mesoescalar zones. *Forest Ecology and Management*. V **234**. Supplement 1.

Simal, C. 2006 (Tesis doctoral) *Análisis meteorológico espaciotemporal de incendios forestales en el NO de España: riesgos y estrategias*. Departamento de Física General y de la Atmósfera. Universidad de Salamanca.

Simard. A.J., 1970: Computer program to calculate the Canadian Forest Fire weather Index. Environ. Can.,Can. For. Serv. Forest Fire Res. Ins., *Internal Rep.* **FF-12**. 18 p.

Simard, A.J.; Valenzuela, J., 1972: A climatological summary of the Canadian Forest Fire Weather Index. Can. For. Serv. Forest Fire Res. Ins., *Internal Rep.* **FF-X-34**. 425 p.

Simard, A.J., 1973: Forest fire weather zones of Canada. *Environ. Can., Can. For. Serv.*

Sohngen, B.L., Haynes, R.W., 1997: The potential for increasing carbon storage in United States unreserved timberlands by reducing forest fire frequency: an economic and ecological analysis. *Climatic Change*, **35**, 179-197.

Stewart, J.M. and Broadbridge P., 1999: Calculation of humidity during evaporation from soil. *Advances in Water Resources*. Vol, **22**. n° 5, pp 495-505.

Stocks, B.J., 1971: Fire severity index distribution in Ontario 1963 to 1968. Canadian Forestry Service, Great Lakes Forest Research ., *Information Report 0-X-151*. 18 p.

Stocks, B.J.; Walker, J.D., 1972: Fire behavior and fuel consumption in jack pine slash in Ontario. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Great Lakes Forest Research Centre, Sault Ste. Marie, Ontario, *Information Report 0-X-169*. 19 p.

Stocks, B.J., 1974: Wildfires and the Fire Weather Index System in Ontario. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Great Lakes Forest Research, *Information Report 0-X-213*. 17 p.

Stocks, B.J. 1975: The 1974 wildfire situation in the North-Western Ontario. *Can. For. Serv., Great Lakes Forest Res. Centre, Inf. Rep. 0-X-232*, 27pp.

Stocks, B.J.; Fosberg, M.A.; Lynham, T.J.; Meams, L.; Wotton, B.M.; Yang, Q.; Jin, J-Z.; Lawrence, K.; Hartley, G.R.; Mason, J.A. & D.W. McKenney, 1998: Climate Change and Forest Fire Potential in Russian and Canadian Boreal Forests. *Climatic Change*, **38**, 1-13.

Strasburguer, E., Noll, I., Schenck, H., Schimper A.F.W., Harder, R., Schumacher, W., Firbas, F., y Von Denffer, D.R, 1960: *Tratado de Botánica*. 5° edición española traducida por Dr. Oriol de Bulos. Ed. Manuel Marín & cía. Barcelona.

Street, R.B., Birch, E.C., 1986: Synoptic fire climatology of the Lake Athabasca-Great Slave Lake Area 1977-1982. *Climatol. Oceanogr. Bull. (Canada)*. **20**, 3-18.

Stull, R., 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publications, Amsterdam.

Stull, R., 2000. *Meteorology for Scientists and Engineers* 2nd edition. Brooks / Cole Thomson Learning, Pacific Grove (California).

Swetnam, T. W., 1990: Fire history and climate in the Southwestern United States. Pp. 6-17 In: *Proceedings of Symposium on Effects on Fire in Management of Southwestern Natural Resources*. Krammes, S. J., editor General Technical Report RM-191. U.S. Forest Service.

Swetnam, T.W., and J. L. Betancourt., 1992: Temporal patterns of El Niño/Southern Oscillation - wildfire patterns in the southwestern United States. pages 259-270. *In El Niño: Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation* Diaz H. F. and V. M. Markgraf, eds., Cambridge University Press, Cambridge.

Taylor, R.J.; Evans, S.T.; King, N.K.; Stephens, E.T.; Packham, D.R. & R. G. Vines, 1973: Convective Activity Above a Large-Scale Bushfire. *Journal of Applied Meteorology*, **12** (7), 1144-1150.

Thornthwaite, C.W., 1948. An Approach Toward a Rational Classification of Climate. *Geograph. Rev.* 38-55.

Thornton, P.E.; Running, S.W. & M.A. White, 1997: Generating surfaces of daily meteorology variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology*, **190**, 214-251

Thunis, P., Bornstein, R., 1996. Hierarchy of Mesoscale Flow Assumption ABD Equations. *J. Atmos. Sci.* **53**, 380-397.

Trigo RM, Osborn TJ, Corte-Real J., 2001: The North Atlantic Oscillation influence on Europe: climate impacts and associated physical mechanisms. *Climate Research*, **20**, 9-17.

Trigo RM, Corte-Real J, Osborn T.J, 2004a: Influencia de la Oscilación del Atlántico Norte en el clima del continente europeo y su impacto en el caudal de los ríos ibéricos. *En "La Oscilación del Atlántico Norte y su influencia sobre la Península Ibérica y Canarias"*. 135-158. ISBN: 84-95780-15-1

Trigo RM, Pozo-Vázquez D, Osborn TJ, Castro-Díez Y, Gámiz-Fortis SR and Esteban-Parra MJ, 2004b: North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.*, **24**, 925-944, DOI: 10.1002/joc.1048.

Turc, L., 1961: Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration Potentielle (Formule Climatique Simplifiée et Mise a Jour). *Ann. Agrono.* **12** (I). 13-14.

Turner, J.A., 1966: The stored moisture Index: a guide to slash burning. *Columbia Forest Serv., Protection Div.* 7 p.

Turner, J.A., 1972: The Drought Code Component of the Canadian Forest Fire Behavior System. Can. Dep. Environ., *Can. For. Serv. Publication* 1316.

Turner, J.A., 1973: A fire load index for British Columbia. Environ. Can., Canadian Forestry Service, Pacific Forest Research Centre, *Information Report BC-X-80*. 16 p.

Turner, J.A.; Lawson, B.D., 1978: Weather in the Canadian Forest Fire Danger Rating System: a user guide to national standards and practices. Environment .Canada, Canadian Forestry Service, Pacific Forest Research Centre, Victoria, B.C. *Information Report BC-X-177*. 40 p.

Valette, J.C., 1993: Flammabilities of Mediterranean Species: I.N.R.A.'s Methodology. *I.N.R.A. Document interne PIF9382*, 14 pp.

Van Wagner C.E., 1970a: An index to estimate the current moisture content of the forest floor. *Can. Dep. Fish. For., Can. For. Serv. Publication* 1288. 23 p.

Van Wagner, C.E., 1970b: Conversion of William's severity rating for use with the Fire Weather Index. Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station, *Information Report PS-X-21*. 5 p.

Van Wagner, C.E. ,1972a: Equilibrium moisture contents of some fine fuels in eastern Canada. Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station, *Information Report PS-X-36*. 11 p.

Van Wagner, C.E., 1972b: A table of diurnal variation in the Fine Fuel Moisture Code. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station, Chalk River, *Ontario Information Report PS-X-38*. 8 p.

Van Wagner, C.E., 1972c: Duff consumption in eastern pine stands. *Can. J. Forest Res.* **2** (1): 34-39.

Van Wagner, C.E., 1974a: Effect of duff weight on drying rate. *Can. For. Serv. Bi-Mon. Res. Notes* **30** (2): 11-12.

Van Wagner , C.E., 1974b: Structure of the Canadian forest fire weather index. *Canadian Forestry Service. Pub.No* 1333. Ottawa.

Van Wagner, C.E., 1977: A method of computing fine fuel moisture content throughout the diurnal cycle. Fisheries and Environment Canada, Canadian Forestry Service Petawawa Forest. Experiment Station, Chalk River, Ontario. *Information Report PS-X-69*. 15 p.

Van Wagner, C.E., 1979: A laboratory study of weather effects on the drying rate of jack pine litter. *Can. J. Forest Res.* **9** (2): 267-275.

Van Wagner, C.E., 1982: Initial moisture content and the exponential drying process. *Canadian Journal of Forest Research*, **12**, 90-92

Van Wagner, C.E. Pickett, T.L., 1985: Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Government of Canada, Canadian Forestry Service, Ottawa, Ontario. *Forestry Technical Report* **33**. 18 p.

Van Wagner, C.E., 1987: Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Government of Canada, Canadian Forestry Service, Ottawa, *Ontario Forestry Technical Report* **35**. 37 p.

Vega, J.A. & M. Casal, 1988: Contraste de estimadores de humedad del combustible forestal fino muerto en montes arbolados de Galicia (NW de España). *Documentos del seminario sobre métodos y equipos para la prevención de incendios forestales*. Madrid, ICONA, Naciones Unidas Comisión Económica para Europa, Organización Internacional del Trabajo y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 94-97.

Vélez, R., 1982: *Manual de predicción del peligro de incendios forestales*. ICONA. Madrid.

Vélez. R., 1988: Les Incendies de forets dans les pays de la region mediterraneenne. *Documentos del Seminario sobre métodos y equipos para la prevención de incendios forestales*. ICONA. NIPO: 254-88-001-7.p 60-71

Vélez, R., 2000: *La Defensa contra Incendios Forestales*. Ed. McGraw Hill, Madrid.

Ventura. F, Martetto V, Zinoni F., 2001: Un método para el cálculo del índice meteorológico de riesgo de incendio forestal. *Giugno. Sherwood*. n. **68**. 13-15.

Verardo J.D. and William F.R., 1996: Late Pleistocene charcoal in tropical Atlantic deep-sea sediments; climatic and geochemical significance. *Geology*. **V.24**.nº9. p 855-857.

Vilà, M.; Lloret, F.; Ogheri, E. & J. Terradas, 2001: Positive fire-grass feedback in Mediterranean Basin woodlands. *Forest Ecology and Management*, **147**, 3-14.

Viney, N.R., 1991: A review of fine fuel moisture modelling. *International Journal of Wildland Fire*, **1**, 215-234

Von Niessen, W. and Blumen, A. 1986. Dynamics of forest fires a directed percolation model. *J.Phys. A: Math. Gen.* **19**, L289-L293.

Walker GT 1924 Correlations in seasonal variations of weather. *IX Mem. Indian Meteor. Dept.*, **24**, 275-332.

Weise, D.R. & G.S. Biging, 1996: Effects of wind velocity and slope on flame properties. *Canadian Journal of Forest Research*, **26 (10)**, 1849-1858.

Werth, J. and P. Werth 1998: Haines Index climatology for the Western United States. U.S. Department of agriculture Forest Service. *Fire Management Notes*, **58**, 8-17.

Westerling, A.L.; Gershunov, A.; Cayan, D.R. & T.P. Barnett, 2002: Long lead statistical forecasts of area burned in western US wildfire by ecosystem province. *International Journal of Wildland Fire*, **11**, 257-266.

Williams, D.E., 1959: Fire season severity rating. *Can. Dep. Northern Aff. Nat. Resources, Forest Res. Div. Tech. Note* **73**. 13 p.

Wright, J.G., 1933: Forest fire hazard tables for mixed red and white pine forests. *Can. Dep. Interior, For. Serv., Forest Fire Hazard Pap.* **3**. 20 p.

Wright, J.G., 1937: Preliminary improved fire hazard index tables for pine forests at Petawawa Forest Experiment Station. *Can. Dep. Mines & Resources, Dominion Forest Serv.*

Wright, J.G.; Beal, H.W., 1938: Preliminary improved forest fire hazard tables for eastern Canada. *Can. Dep. Mines & Resources, Dominion Forest Serv. Forest Fire Res. Note* **5**. 42p.

Wright, J.G. & Beall, H.W., 1945: The application of meteorology to forest fire protection. *Imperial Forestry Bureau, Technical Communication* No. 4.

WWF/Adena, 2004: *Incendios forestales: causas, situación actual y propuestas*. WWF/Adena, Madrid.

Zhukovvsky, Y. 1974: Comparison of various ways of using meteorological information in economic decision-making. *Meteor. Gidrol.*, **2**, 38-48.

WEBS CONSULTADAS

Webs de Meteorología:

www.ispe.arizona.edu

www.ncdc.noaa.gov

<http://www.oso.noaa.gov/poes/index.htm>.

www.met-office.go.uk.

<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

<http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html>

<http://www.wetterzentrale.de/topkarten/tkfaxbraar.htm>

http://data.ecmwf.int/data/d/era40_daily/

www.ecmwf.int/products/additional

<http://dss.ucar.edu/datasets/ds126.1/data>

www.metbrief.com

http://iri.columbia.edu/climate/forecast/net_asmt/

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/ensoforecast.shtml

http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

www.infomet.fcr.es

www2.uah.es

<http://atlas.snet.gob.sv>

Webs de Incendios y riesgos de fuego:

www.FireModels.org

www.wfas.net

www.ffp.csiro.au

www.latuv.uva.es

<http://www.latuv.uva.es/campo/fvgal.html>

<http://natural-hazards.jrc.it/fires>

www.adai.pt/icffr

<http://maps.geog.umd.edu/firms/>

www.wfas.net

<http://www.proteccioncivil.org/incend.htm>

Webs de Instituciones y administraciones:

www.ipcc.ch

www.jcyl.es

www.xunta.es

www.mma.es

www.inm.es

www.wmo.es

www.ametsoc.org

www.incendiosforestales.org