



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

El Índice de Propagación Potencial (IPP) de Castilla-La Mancha. Herramienta para la predicción del peligro de incendios forestales.

CHICO ZAMORA, F.¹

¹ Unidad de Análisis y Planificación. Centro Operativo Regional de Lucha Contra Incendios Forestales. INFOCAM. Consejería de Desarrollo Sostenible.

Resumen

Se presenta el índice de predicción del peligro de incendios forestales utilizado por el INFOCAM. El índice está compuesto por una parte climática y otra meteorológica sobre la base de un modelo conceptual del régimen de incendios en la región. La parte climática se basa en la identificación de anomalías en las condiciones de temperatura media y condiciones de sequía. La parte meteorológica tiene una arquitectura fundamentada en el índice canadiense (Turner & Lawson, 1978) y se nutre de datos procedentes de la predicción meteorológica.

Los resultados obtenidos muestran la bondad del sistema, y permite basar en él la toma de decisiones tanto técnicas como administrativas en lo referente a gestión de recursos y acciones preventivas.

Palabras clave

Anomalía climática, episodios adversos, estrés hídrico, estrés térmico, incendios forestales, índice meteorológico de peligro, índice de propagación potencial.

1. Introducción

A nivel mundial existen varios índices de peligro de incendios forestales que mediante los datos meteorológicos procedentes de los modelos numéricos de predicción meteorológica tratan de pronosticar la posible intensidad y condiciones de desarrollo que podría alcanzar un incendio forestal.

La base de estos índices es estimar el estado de los combustibles forestales y las características en las que se produciría la propagación del fuego, en función de las condiciones meteorológicas presentes o previstas. La mayoría de ellos implícitamente recogen características específicas para las zonas que en las que fueron inicialmente desarrollados. Aspecto este, que limita su utilización en otras zonas o aéreas donde el régimen de incendios, o las características de los mismos se parecen poco a las de la zona donde el índice originalmente se desarrolló.

Las experiencias de aplicación de esos índices en Castilla-La Mancha no ha resultado lo suficientemente satisfactorias como para basar en ellos la toma de decisiones técnicas en cuanto a gestión de recursos, medidas preventivas, o limitaciones en el uso y actividades a desarrollar en el entorno natural para prevenir la ocurrencia de posibles incendios.

La necesidad de contar con un sistema confiable que ayudase a predecir la intensidad y características de los posibles incendios forestales en la región, motivó la puesta en marcha de una serie de iniciativas que dieron como resultado final el desarrollo de un sistema de predicción del peligro por incendio forestal. El sistema muestra unos altos niveles de confianza y permite servir de apoyo a la toma de decisiones técnicas o administrativas.

2. Objetivos

Los objetivos del presente documento son:

- Definir y dar conocer el Índice de Propagación Potencial (en adelante IPP),
- Describir la metodología de cálculo y los datos necesarios para ello,
- los productos e información que se pueden obtener de él

- Conocer las limitaciones que se han encontrado para su empleo.

3. Metodología

3.1. Definición y conceptos básicos

El IPP es un indicador numérico de máximos, que caracteriza la intensidad, el desarrollo y la dificultad de extinción que un incendio forestal podría llegar a alcanzar en un momento y en lugar determinados.

Al ser un indicador de máximos, no quiere decir que todos los incendios que ocurran deban tener esas características, si no que ese suceso máximo es posible en el territorio. Teniendo en cuenta que el IPP no valora la existencia o el tipo de cobertura vegetal sobre el territorio, ni otro tipo de variables que serían más propias de un simulador de incendios que de un indicador de peligro.

El IPP estima el estado de los combustibles forestales mediante la situación climática existente y la predicción meteorológica, evaluando de esta interacción de forma adimensional el posible desarrollo energético de un incendio forestal (intensidad).

En cuanto a la cobertura forestal el IPP parte de la hipótesis que el todo el territorio está cubierto con una estructura de combustible donde están presentes todos los elementos combustibles forestales (combustibles muertos de todas las categorías de tamaño y elementos vivos en el estrato superficial y aéreo), es decir una estructura de combustible con capacidad de dar la máxima intensidad energética posible.

También supone que la propagación del fuego en su mayor parte es regida por los combustibles finos muertos (1HR). Los otros elementos combustibles existentes ayudaran a la propagación aportando intensidad. Por tanto, el fuego se propaga principalmente por los elementos finos muertos, con presencia y más o menos participación del resto de elementos combustibles (vivos o muertos).

La presencia de elementos vivos es tenida en cuenta por el IPP. Los combustibles vivos pueden influir en la propagación del siguiente modo:

- Vivo con altos contenidos de humedad. Puede limitar los niveles de propagación
- Vivo con contenidos de humedad moderados. Tendrán poca influencia.
- Vivo con bajos contenidos de humedad. Favorecerá la propagación aportando intensidad.

3.2. Arquitectura del IPP.

El IPP es un modelo conceptual basado en la experiencia y la observación de la evolución del régimen de incendios en el territorio de Castilla-La Mancha.

A diferencia de otros índices de peligro que se basan exclusivamente en datos meteorológicos, el IPP consta una parte climática y otra meteorológica.

La parte climática es sensible al nivel de anomalía climática existente y está basada en la observación meteorológica (datos observados procedentes de estaciones meteorológicas). A este factor lo denominaremos **Anomalía Climática (AC)**.

La parte meteorológica se obtiene a partir de los datos proporcionados por los pronósticos procedentes de los modelos numéricos de predicción meteorológica. A este factor del índice lo denominaremos **Índice de Peligro Meteorológico (IMP)**.

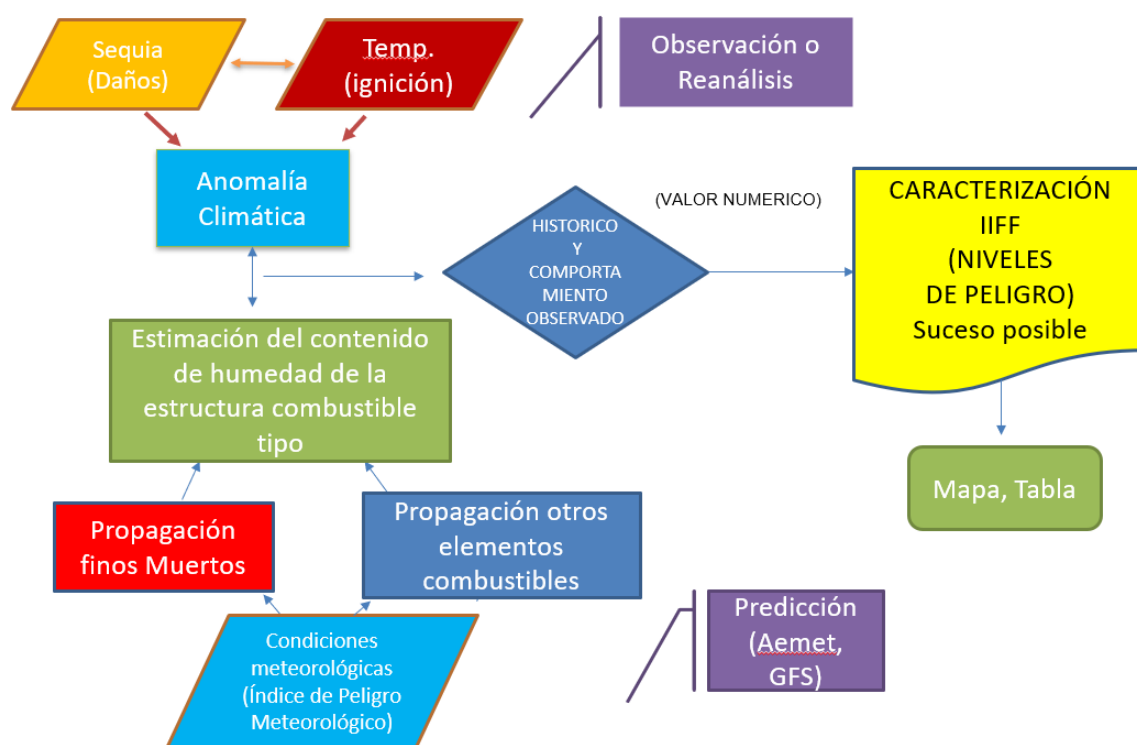


Figura 1. Modelo conceptual y estructura del Índice de Propagación Potencial en Castilla-La Mancha. Un modelo conceptual es una representación de un sistema hecho de conceptos con el fin de ayudarnos a interpretar la complejidad de la realidad del posible comportamiento del fuego.

3.2.1. Anomalía climática (AC)

La anomalía climática intenta reflejar las condiciones de disponibilidad del combustible forestal vivo (entendiendo la disponibilidad como los niveles de participación del combustible forestal en los procesos de combustión). Se basa en el hecho de que los episodios de incendios forestales más graves se producen cuando se dan dos situaciones climáticas anómalas:

- Los niveles de sequía (déficit hídrico del suelo) son más altos que los valores medios históricos.
- La temperatura media en los días previos está por encima de los valores medios históricos.

Esto en definitiva, supone que el vegetal sale de su rango de habitabilidad y adaptación al territorio, y comienza a sufrir un estrés, que en el caso que nos ocupa, se materializa en una pérdida del contenido de humedad del combustible vivo.

Los peores episodios de incendios en la región se han producido en años en los que los niveles de sequía eran muy altos, y simultáneamente se producen episodios con temperaturas muy por encima de la media histórica, no necesariamente tienen que ser olas de calor, en que los valores de temperaturas son extremos.

Dos de los peores años de incendios fueron 1994 y 2005, en estos años los niveles medios anuales de sequía en la región fueron mayores que el percentil 75, y en concreto en el caso de los Grandes Incendios Forestales (GIF), mayores de 10.000 ha. En estos años las condiciones locales de sequía estaban por encima del percentil 95. En 1994 los episodios de altas de temperaturas de mediados de julio y principios de agosto afectaron a los incendios de San Martín de Boniches (Cuenca) y Yeste (Albacete) respectivamente. En el año 2005 la ola de calor de mediados de julio, influyó negativamente en el desarrollo del incendio de La Riba de Saelices (Guadalajara), con el trágico resultado de 11 personas fallecidas.

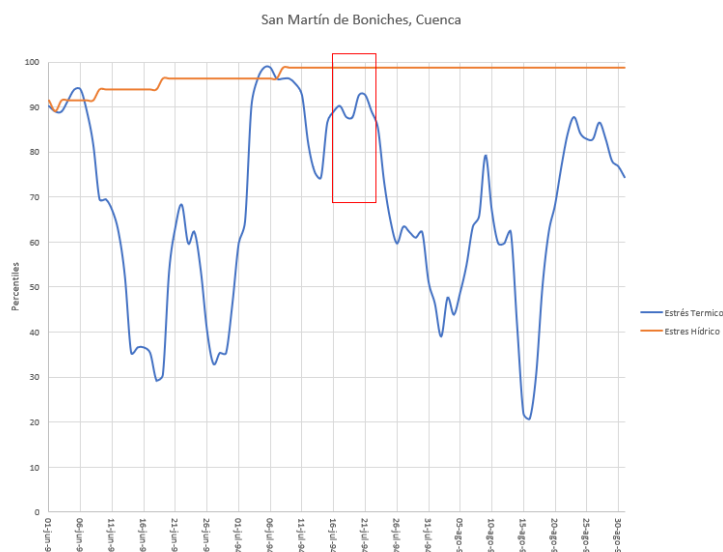


Figura 2. Condiciones de anomalía climática durante el incendio de San Martín de Boniches (Cuenca) 16/07/1994

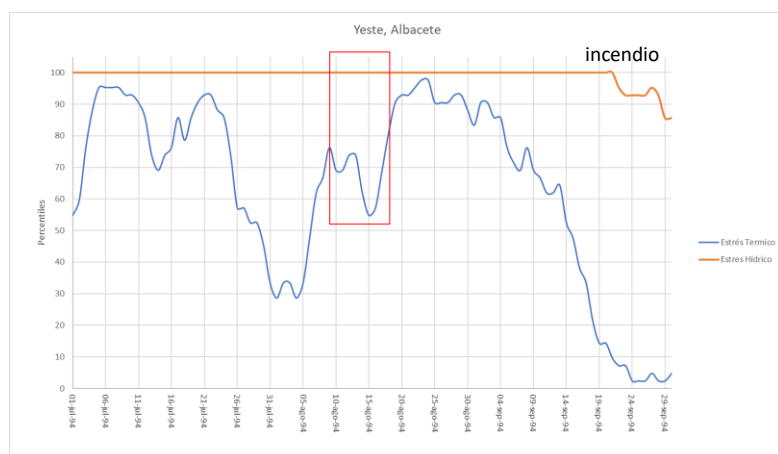


Figura 3. Condiciones de anomalía climática en el incendio de Yeste, Albacete 08/08/1994.

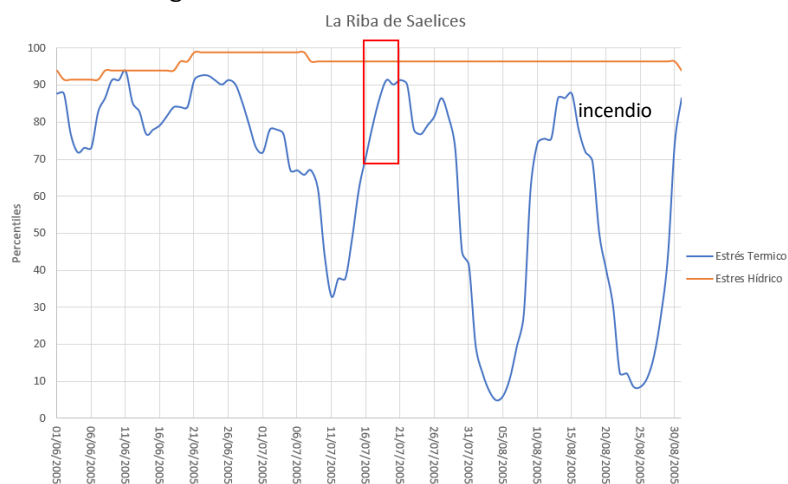


Figura 4. Condiciones de anomalía climática durante el incendio de la Riba de Saelices (Guadalajara), 16/07/2005.

En periodos (años) en que hay buena hidratación del suelo (por ejemplo, año 2018), incluso en episodios de altas temperaturas en época estival (ola de calor de principios de agosto de 2018),

pueden ocurrir incendios, pero el comportamiento de los mismos es mucho menos agresivo. Lo que permite que esos incendios sean contenidos con mayor facilidad por el dispositivo de extinción.

Periodos en que la media de temperaturas (en época estival) está por muy por debajo de los valores normales, incluso existiendo un déficit hídrico significativo el combustible vivo puede recuperar algo de humedad, (menores niveles de perdidas por evapotranspiración). En estos casos el número y la intensidad de los incendios decrece.

La anomalía climática es una composición de las condiciones de estrés térmico y estrés hídrico que sufre el vegetal (valor medio entre ambos factores). Compara cada localización consigo misma mediante percentiles históricos, para cada día del año. Percentiles altos conllevan una mayor pérdida de las condiciones de humedad del vegetal y por tanto, que aumente la disponibilidad de los combustibles forestales.

Estrés térmico:

El concepto de estrés térmico se basa en el hecho de que temperaturas muy elevadas, fuera del rango de adaptación de cada especie, alteran la actividad fisiológica del vegetal. Estas alteraciones pueden ser morfológicas, fisiológicas, disminución de los procesos de fotosíntesis, quemadura foliar, etc. Estas alteraciones conducen a una pérdida del contenido de humedad del vegetal y por tanto a un aumento de los niveles de disponibilidad. Un aumento del estrés térmico influye directamente en el incremento del número de posibles igniciones (incendios). Evidentemente, la ocurrencia de un posible incendio es algo totalmente circunstancial, y en el caso de nuestro país que la mayoría de las igniciones están asociadas a causas antrópicas, difícilmente predecibles, pero los episodios de temperaturas elevadas favorecen en mayor o menor medida el incremento del número de igniciones.

El caso más acusado de estrés térmico se produce en verano con las entradas de la dorsal africana (olas de calor) sobre la península que alteran notablemente la actividad fisiológica de la vegetación interrumpiendo incluso el ciclo día-noche del vegetal, cuando este recupera la humedad perdida durante el día. No obstante, en otras épocas del año, en las que las temperaturas estén por encima de los valores medios históricos, tienen claros efectos en el número de incendios ocurridos, aunque estos sean de menor entidad que los ocurridos en la época estival.

El estrés térmico se calcula con el percentil de la temperatura media de los últimos 8 días para cada día determinado del año. El periodo de referencia a tomar para el cálculo del estrés térmico intenta representar la inercia respecto a la variación de la disponibilidad que tienen los combustibles forestales.

Estrés hídrico:

Representa el déficit hídrico en el suelo (sequía) que al igual que en el caso anterior, altera la actividad fisiológica del vegetal. Las alteraciones que provoca son: cierre de estomas, escisión de órganos, parón vegetativo y algunas otras perturbaciones. Las condiciones de sequía están directamente relacionadas con el nivel de intensidad que producen los incendios, y tiene una relación directa con el nivel de daños (superficie afectada). Los años con incendios de superficie afectada mayor de 10.000 ha en Castilla-La Mancha (1994 y 2005) los niveles promedio de sequía anual estaban por encima del percentil 75.

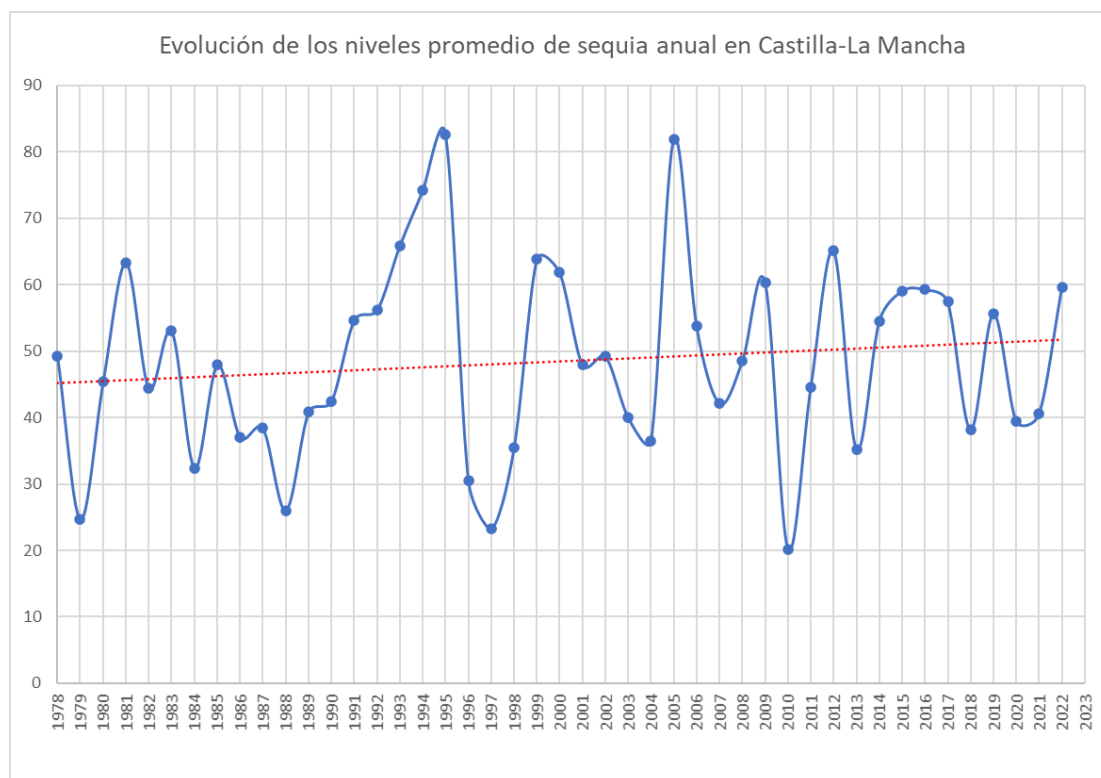


Figura 5. Evolución de los niveles promedio de sequía anual. Destacan claramente 3 años 1994, 1995 y 2005 con percentiles promedio por encima del 75. El año 1995 tuvo un verano con condiciones de temperaturas más favorables que 1994, y episodios de precipitación (tormentas) periódicos que mitigaron los efectos de la acusada sequía. La línea roja punteada muestra la tendencia ascendente de los niveles de sequía promedio en el período analizado.

El estrés hídrico se estima mediante percentiles del Drought Code (DC) para cada día del año. El Drought Code forma parte del Fire Weather Index o Índice Canadiense (Turner & Lawson, 1978). El DC evalúa el contenido de humedad de las capas más profundas del suelo forestal y de los combustibles muertos de mayor categoría de tamaño. El DC baja con la lluvia efectiva (> 2 mm en Castilla-La Mancha) y sube cuando los niveles de evapotranspiración son mayores. A mayores niveles de DC el impacto en el comportamiento del fuego será mayor debido a una mayor carga de combustible disponible y posiblemente la resistencia al control del incendio se verá incrementada. Dado que la profundidad y características de los suelos del centro peninsular difieren significativamente de los de Norteamérica, los valores en bruto del DC resultaban poco significativos y se recurrió al análisis climático con percentiles igual que en el caso del estrés térmico.

Por tanto, la Anomalía Climática es el valor medio entre el estrés hídrico y el estrés térmico. Ambos valores entran en el sistema de cálculo del IPP en tanto por uno. De este modo obtenemos un valor diario de AC para cada uno de los puntos de muestro de la región.

$$AC = \frac{ET + EH}{2}$$

AC: Anomalía Climática

ET: Estrés Térmico.

EH: Estrés hídrico.

Los periodos en los que la anomalía climática es muy baja el número de incendios y las superficies afectadas por los mismo tienden a ser menores, y en el caso contrario, con niveles de anomalía climática mayor (invierno y primavera >0,80, época estival > 0,65) se corresponden con periodos más activos de incendios forestales. Para obtener valores lo suficientemente consistentes

y sólidos se necesita contar con series de datos históricos de al menos 30 años, para que los percentiles de cada uno de los factores sean lo suficientemente representativos.

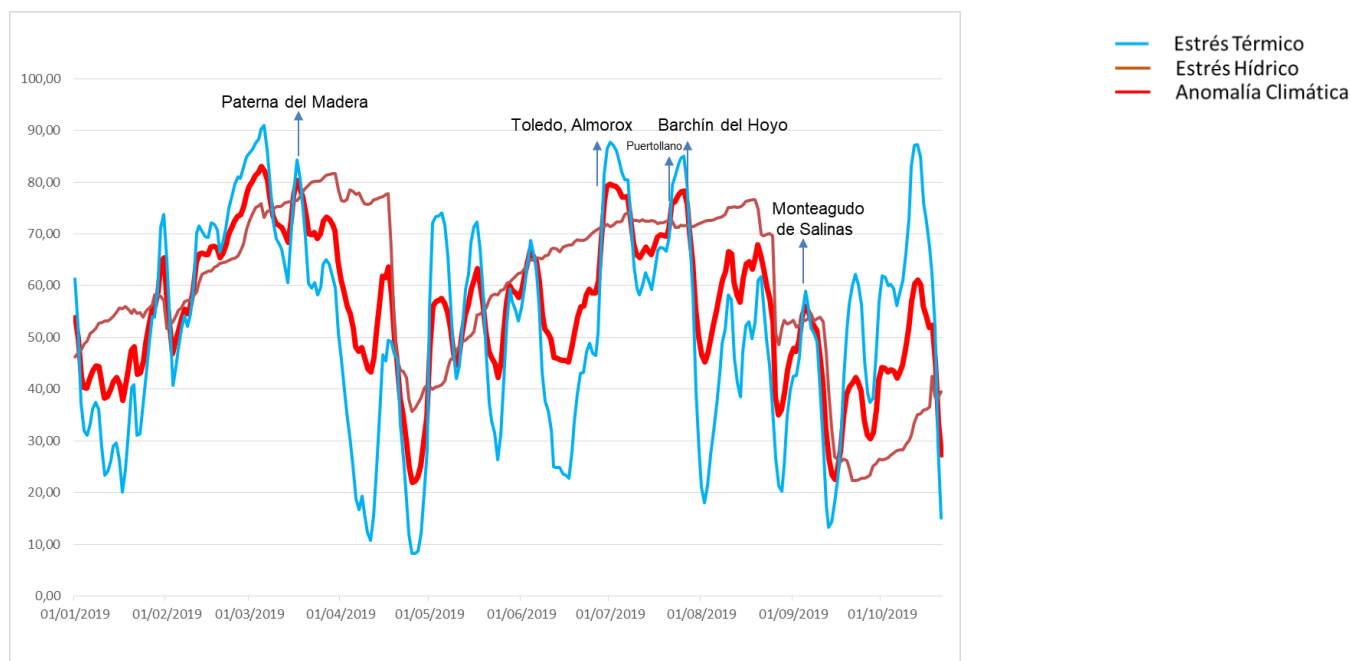


Figura 6. Evolución de los niveles de Anomalía Climática a nivel regional desde enero a noviembre del año 2019, y ocurrencia de los incendios forestales más relevantes. Se puede observar que los incendios siempre están en las crestas o fases crecientes de los niveles de anomalía climática, que vendrá condicionada por la evolución del estrés térmico y del estrés hídrico.

3.2.2. Índice Meteorológico de Peligro.

La parte meteorológica del IPP se nutre de los pronósticos horarios proporcionados por los modelos numéricos de predicción meteorológica. Las variables meteorológicas necesarias para su cálculo son:

- temperatura,
- humedad relativa,
- precipitación,
- velocidad del viento
- % cobertura de nubes.

La estructura del Índice Meteorológico de Peligro es similar a la que presenta el Fire Weather Index o índice canadiense (Turner & Lawson, 1978), y se compone de dos subíndices principales.

- **El índice de Propagación Inicial (IPI):** evalúa la capacidad del fuego de propagar sobre combustibles finos muertos (1HR). En este subíndice operan la humedad de los combustibles finos muertos y la velocidad del viento. El IPI por tanto será el indicador que se debe tener en cuenta para ver las características de posibles propagaciones sobre estructuras de combustibles donde el fuego se mueve exclusivamente por combustibles finos muertos.
- **El índice de Consumo de combustible (IC):** evalúa los niveles de participación de en los procesos de combustión de otros combustibles, además de los combustibles finos muertos, aportando mayor intensidad energética al proceso. Este subíndice pondera los niveles de participación de los combustibles medios muertos (10HR) y los de combustibles muertos de categorías superiores mediante el valor absoluto del Drought Code (DC).

Las variables meteorológicas que entran en cada uno de los indicadores son las que se muestran en la figura 7:

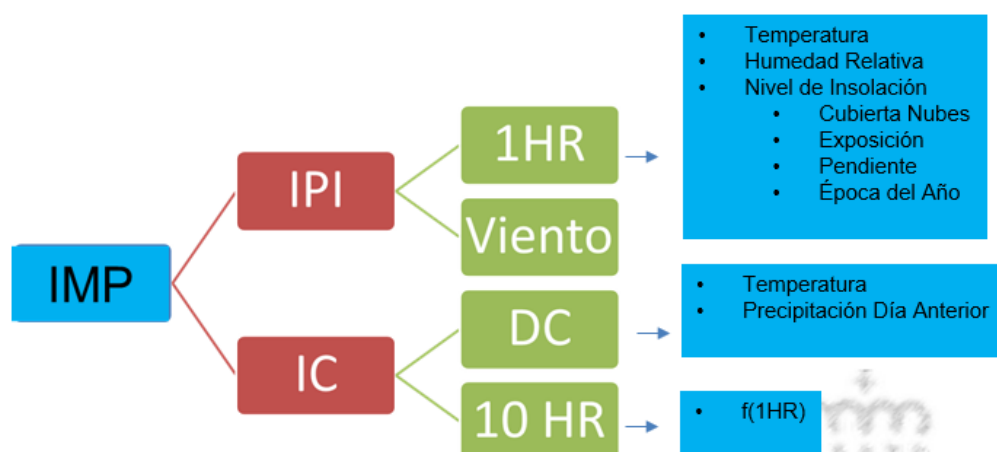


Figura 7. Índice Meteorológico de Peligro y variables meteorológicas necesarias para el cálculo de cada uno de los factores que lo integran.

1 HR y 10 HR representan las humedades de los combustibles finos muertos y medios muertos respectivamente. Es decir, combustibles muertos de 1 y 10 horas de tiempo de retardo (Fosberg & Deeming, 1971).

Para el cálculo de las humedades de los combustibles medios muertos se utilizan modelos locales de variación a partir de series de observación en fuel stick, (Nelson, R.M., 2000)

El Índice meteorológico de peligro (IMP) es un valor numérico adimensional que representa una intensidad, velocidad de propagación por carga de combustible, (Byram, 1959) de manera similar a como lo hace el FWI.

Para el cálculo del IMP se está usando los datos procedentes de la predicción horaria proporcionada por Aemet mediante el modelo Harmonie-Arome con un horizonte de predicción de 72 horas. Para predicciones a medio plazo se utilizan los datos del Global Forecast System (GFS), ambos están disponibles de manera gratuita.

Por tanto, se obtiene un valor horario del IMP para los distintos puntos de muestreo de la región. Tener un valor horario, ya supone una diferencia sustancial con otros índices como el Fire Weather Index que solo da un valor diario del índice a las 12:00 UTC. Esto permite que el IPP pueda ser usado como estimador de posibles ventanas de operaciones, o como estimador de la prescripción en la ejecución de quemas prescritas.

3.3. Índice de propagación potencial.

El valor final del IPP para cada hora del día y para cada punto de predicción se obtiene de la siguiente forma

$$IPP = AC * IMP$$

IPP: Índice de propagación potencial

AC: Anomalía climática

IMP: Índice meteorológico de peligro.

Aunque las salidas del IPP son horarias, para establecer el nivel de peligro diario en la región, se da un valor promedio diario, que se calcula como la media aritmética de los valores entre las 12 y las 18 horas para cada punto (según el histórico de incendios, es la franja horaria de

máxima ocurrencia de incendios). El valor de esos puntos se interpola mediante un sistema de información geográfica (SIG) y se obtiene una especialización de esa salida diaria (Figura 8), representando los valores del índice divididos en cinco categorías o clases, que representan los distintos niveles de peligro que se pueden obtener con el IPP.

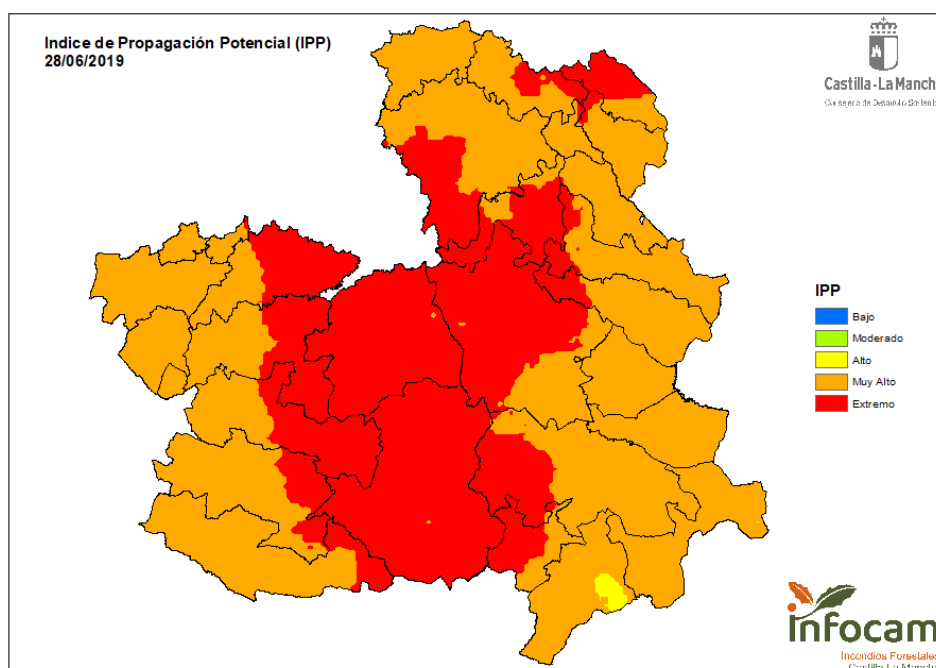


Figura 8. Valor diario del IPP para el 28/06/2019, día de ocurrencia de los GIF de Almorox y Toledo. Los distintos colores representan cada una de las cinco clases de peligro en las que se clasifica el IPP.

Continuando con el ejemplo del 28/06/2019, en la figura 9 se pueden observar las salidas horarias del IPP para Toledo. La información horaria es una primera aproximación a cuáles pueden ser las ventanas de operaciones más efectivas.

Hora	T	HR	P.R.	Vel.	- Direccion -	Racha	Cielo	Tcc%	Ppt	1HR	10HR	IPP
0	29	35		4	SE		7 Despejado		0	7	8	26,6
1	28	45		8	O		11 Despejado		0	9	10	22,1
2	27	33		4	S		12 Despejado		0	6	7	35,4
3	25	46		5	O		6 Despejado		0	9	10	18,0
4	24	50		6	SO		7 Despejado		0	10	11	15,8
5	22	55		6	SO		8 Despejado		0	10	11	15,8
6	21	57		3	SO		8 Despejado		0	10	11	12,5
7	22	52		4	SE		5 Despejado		0	10	11	13,6
8	25	38		15	E		21 Despejado		0	8	9	39,7
9	28	32		18	E		26 Despejado		0	8	9	44,9
10	31	26		19	E		29 Despejado		0	7	8	60,4
11	34	21		20	E		31 Despejado		0	5	6	120,1
12	36	17		19	E		32 Despejado		0	3	4	306,9
13	39	14		18	SE		31 Despejado		0	3	4	294,6
14	37	12		23	SE		38 Despejado		0	2	3	772,0
15	39	11		19	SE		39 Despejado		0	2	3	661,5
16	42	8		29	SE		47 Despejado		0	1	2	3560,1
17	41	8		35	SE		53 Despejado		0	2	3	1103,5
18	41	8		35	SE		53 Despejado		0	2	3	1103,5
19	41	9		34	SE		51 Despejado		0	3	4	491,0
20	39	10		34	SE		48 Despejado		0	4	5	281,0
21	37	11		26	SE		46 Despejado		0	5	6	146,6
22	35	13		21	SE		34 Despejado		0	6	7	87,6
23	34	15		23	SE		30 Despejado		0	3	4	356,0

Figura 9. Salidas horarias del IPP calculadas con los datos procedentes de Harmonie-Arome, para el 28/06/2019 en Toledo.

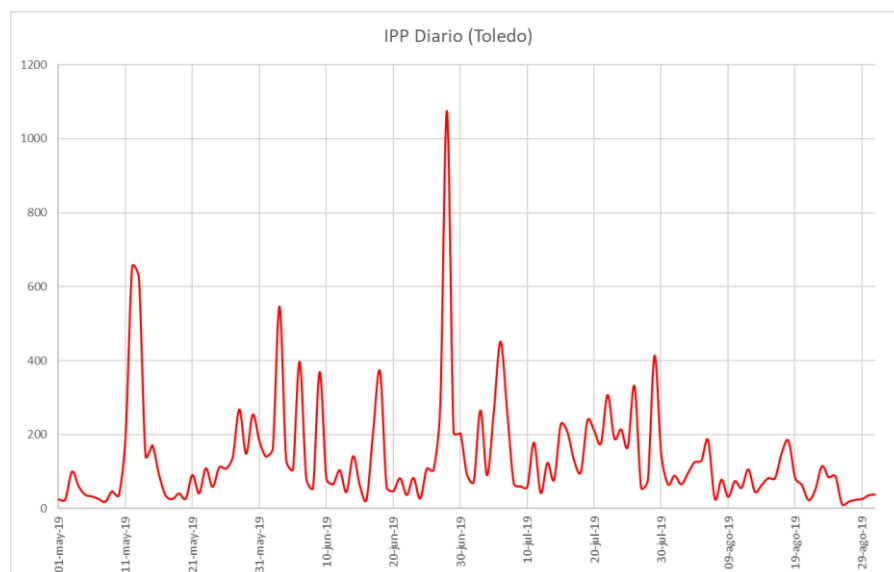


Figura 10. Variación del IPP diario en Toledo desde el 01/05/2019 al 31/08/2019. El valor más alto, con diferencia se alcanza el día en que se produjo el incendio.

3.4. Clases de peligro y calibración del índice.

Los valores del IPP están escalados en cinco clases de peligro, estas clases representan el comportamiento que el fuego potencialmente podría llegar a alcanzar. Las clases se han establecido en función del comportamiento observado en los incendios en los últimos años. Para el establecimiento de las clases se han utilizado parámetros del comportamiento que son fácilmente medibles, como son:

- Velocidad de propagación sobre el eje principal del incendio (m/min.)
- Tasa de crecimiento superficial del incendio (ha/h) o Δ
- Distancia de emisión y tipo (puntual o masiva) de focos secundarios (m.)
- Longitud de llama en la zona más energética (m.)

Para poder efectuar todo este trabajo se está reconstruyendo el IPP para la región desde 1979 hasta la actualidad. Esto ha sido posible gracias a los reanálisis meteorológicos horarios ERA5, procedentes del sistema Copernicus-ECMWF (Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo) de la Unión Europea, que han permitido completar o rellenar muchas de las lagunas de información meteorológica histórica existente.

Los valores obtenidos que caracterizan el comportamiento para cada una de las clases de peligro son los siguientes:

Nivel de Peligro	Vel. Prop. Med./Max. (m/min)	Long. Llama med. (m.)	Focos 2º Punt. (m.)	Focos 2º Masivos (m.)	Δ (ha./h.)
0 Bajo	0,5	0,2	no	no	<1
1 Moderado	6	1,8	25	no	2,5
2 Alto	12/15	4	80	20	15
3 Muy Alto	20/33	11	220	60	70
4 Extremo	45/75	20	475	90	204

Figura 11. Valores observados que caracterizan el comportamiento del fuego en cada una de las clases de peligro en que se clasifica el IPP.

La calibración de los valores del índice se ha efectuado sobre la base de los incendios históricos acaecidos en la región a partir del año 2007. Se toma 2007 como año de referencia porque es desde el momento en que se cuenta con un dispositivo con capacidad de extinción y características similares al actual.

Las características climáticas (continentalidad) de Castilla – La Mancha concentran la época de peligro, de manera muy clara, en los meses estivales: junio, julio, agosto, septiembre y en ocasiones octubre. El período crítico en época estival se encuentra situado históricamente entre el 15 de junio y el 15 de agosto. El resto del año la ocurrencia de incendios está condicionada por la evolución meteorológica y climatológica, pero el número de incendios y la gravedad de los mismos, no son comparables a los valores de la época estival. Por el momento existe una clara limitación de la intensidad en esos incendios de invierno, de acuerdo con los datos históricos. Circunstancia esta que el IPP debe reflejar. Esto no quiere decir que en el escenario de cambio climático actual no sea posible un cambio de tendencia, y se empiecen a observar incendios de mayor intensidad fuera de la época estival.

El hecho anterior obliga a tener una doble calibración, una para el período estival (verano) y otra para el resto del año (invierno).

INVIERNO, PRIMEVERA, OTOÑO

Limitaciones en intensidad (y superficie), según histórico (superficie afectada < 300 ha)

Enero, febrero, marzo, abril, mayo, noviembre, diciembre		
Nivel de Peligro	IPP	Observaciones
Bajo	0-25	IF baja intensidad; (< 5 Ha)
Moderado	25-83	IF Media Intensidad (5-50 ha, Normalmente <25 Ha)
Alto	83-1800	Comportamiento alta intensidad . > 50 has.,
Muy alto	>1800	Muy alta intensidad , posible pero no se ha dado.

Figura 12. Calibración de “invierno” del IPP, donde históricamente por el momento existe una clara limitación en la intensidad y nivel de daños de los incendios ocurridos. Los valores en superficie son orientativos.

VERANO

Sin limitación en el comportamiento del fuego

Junio, julio, agosto, septiembre, octubre		
Nivel de Peligro	IPP	Observaciones
Bajo	0-18	IF baja intensidad; (< 5 Ha)
Moderado	18-54	IF Media Intensidad (5-50 ha)
Alto	54-172	Comportamiento alta intensidad . (50-300 ha)
Muy alto	172-560	Muy Alta Intensidad (300-1000Ha)
Extremo	>560	Comportamiento extremo (>1000 Ha).

Figura 13. Calibración de “verano” donde los incendios se desarrollan sin limitaciones energéticas. Los valores en superficie son orientativos.

El paso de la calibración de invierno a verano se hace en función de la evolución de las condiciones meteorológicas y climáticas para cada año en particular, esto obliga a efectuar un seguimiento de cómo se van comportando los incendios y los desarrollos que van teniendo. Trabajo este que es realizado por el analista de incendios.

4. Resultados.

La relación entre el IPP promedio mensual y la superficie quemada en la región es muy robusta. Durante el mes de julio (Figura 12) que es cuando se producen la mayor número de los incendios y se quema un gran porcentaje de la superficie anual, el coeficiente de determinación (r^2) es de 0.8618 y da idea de la bondad del sistema. Para el resto de los meses del año los r^2 se mueven en valores similares, excepto en el mes de enero en que la relación IPP-superficie quemada es menos robusta que en los otros meses ($r^2 = 0.36$). Esto es debido al escaso número de incendios y la poca superficie quemada históricamente en ese mes, que provoca que el índice no tenga la suficiente sensibilidad, para detectar cambios, ya que las condiciones meteorológicas normalmente son muy desfavorables para el desarrollo de incendios forestales. En el mes de enero el IPP promedio mensual se mueve en un rango de valores que van de 2-12, con valor un medio histórico de 6. Sin embargo, durante el mes de julio el valor medio histórico varía de 10 a 238, con valor medio de 86 puntos.

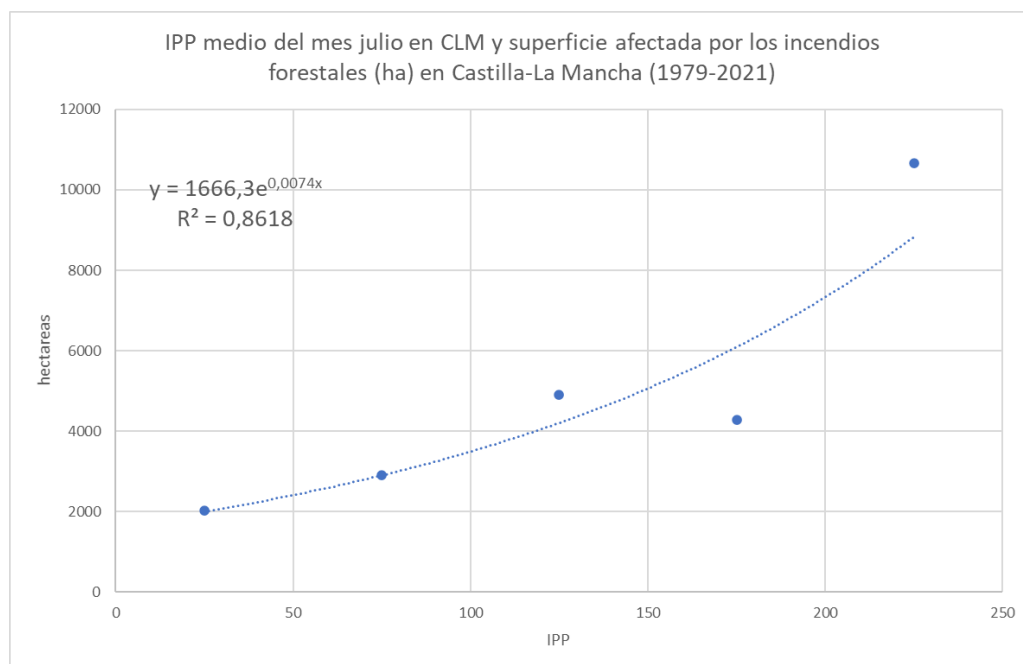


Figura 14. Regresión exponencial valor medio del IPP en el mes de julio (agrupado en clases de 50), superficie quemada durante ese mes.

De manera oficial el IPP se viene utilizando como índice de peligro por el plan INFOCAM desde el año 2019. Los resultados son muy satisfactorios y el IPP y los productos complementarios que se pueden obtener de él se están utilizando por el INFOCAM de la siguiente manera.

- Índice oficial de peligro diario,
- Establecimiento de limitaciones especificadas en los pliegos de condiciones para distintas actividades en el medio natural.
- Establecimiento de limitaciones al ciudadano en el uso y disfrute del medio natural en función de la previsión de evolución de los niveles de peligro diario.
- El análisis de la evolución de la anomalía climática (condiciones de sequía y temperatura) permite conocer y prever a medio plazo la posible evolución del régimen de incendios en la región, y por tanto, principalmente en épocas de peligro bajo o medio, adecuar el número de recursos de extinción a ese régimen de fuegos.
- Optimizar el posicionamiento de recursos de acuerdo a la evolución histórica de los niveles de peligro en las distintas comarcas de la región.
- El IPP horario para cada localización permite obtener una primera aproximación de posibles ventanas de operaciones.
- De igual manera, en el caso de las quemas prescritas los valores horarios se utilizan para tener un pronóstico local del posible comportamiento del fuego y determinar si está dentro o fuera de la prescripción.
- A nivel diario se pueden determinar el número y localización de incendios históricos compatibles con los niveles del IPP (Figura 15) o de condiciones de sequía. Esta es una herramienta de apoyo a decisiones estratégicas de movilización de recursos de una zona a otra de la región en función de los niveles de peligro e incendios esperados en cada comarca.

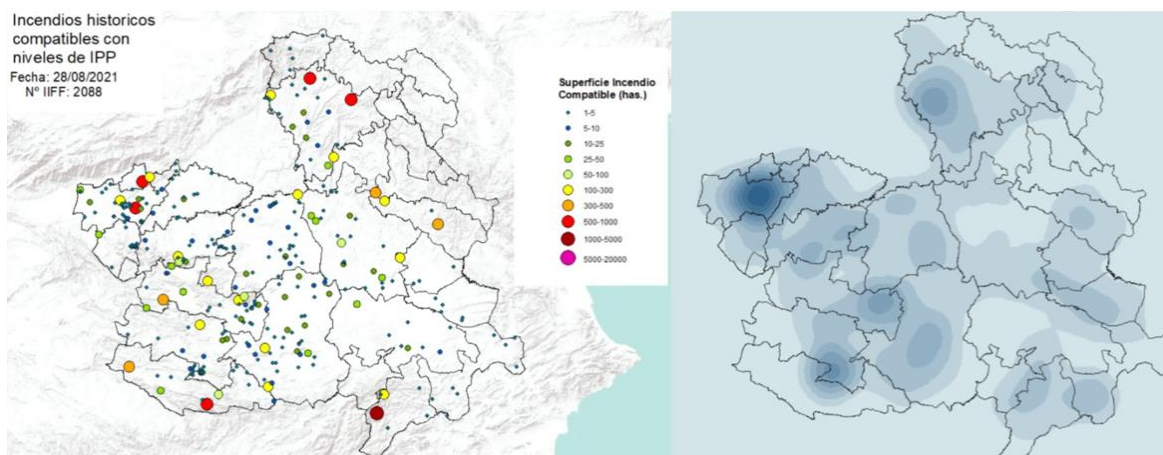


Figura 15. Incendios históricos compatibles (> 1ha) con los niveles de peligro medio por comarcas previstos para un día determinado (izquierda). Función de densidad de puntos (derecha). Herramienta de apoyo para la toma de decisiones en caso de movilización de recursos de unas zonas a otras para reforzar la respuesta a una emergencia.

4.1. Detección de Episodios Adversos (EA)

Desde el punto de vista de la planificación estratégica, es necesario conocer cuando se van a producir, lo que se define como Episodios Adversos (EA). Los EA son períodos que superan de forma significativa (más de 3 días de duración) el percentil 95 del IPP medio a nivel regional. Durante estos EAs se produce una combinación de parámetros meteorológicos o climáticos que inciden de forma negativa en la ocurrencia e intensidad de los incendios forestales (olas de calor, episodios de viento, inestabilidad, altos niveles de sequía, ..., etc.). En estos episodios críticos se quema en unos pocos incendios un alto porcentaje de la superficie anual en la región, y es, por tanto, cuando existe una mayor probabilidad de ocurrencia de GIFs, y de condiciones favorables para la simultaneidad. Este conocimiento permite que desde la dirección del plan se tomen las medidas que se consideren necesarias para afrontar estos períodos críticos.

La ocurrencia promedio de este tipo de episodios en época estival durante el último decenio es de 2 EA anuales. Durante el año 2021 en época estival cuatro de estos episodios tuvieron lugar, con un resultado del 72% de la superficie total anual afectada por incendios forestales. El pronóstico meteorológico con horizontes de predicción de entre 3-5 días permiten vislumbrar la posible ocurrencia de uno de estos episodios.

Tabla 1. Episodios Adversos en Castilla-La Mancha durante 2021 en época estival.

Episodios Adversos (fechas)	Duración (días)	Núm. Incendios	Superficie Afectada (ha)	Núm. Incendios (% total)	Superficie afectada (% total)	Motivo
09/06/2021 - 14/06/2021	6	52	1098,80	2.89	11.17	Masa cálida autóctona
11/07/2021 - 13/07/2021	3	39	1649,44	2.16	16,78	Incursión dorsal africana + episodio de viento
22/07/2021 - 25/07/2021	4	40	3265,07	2.22	33.22	Incursión dorsal africana + episodio de

						viento
13/08/2021 - 17/08/2021	5	54	1126,95	2.99	11.46	Ola de calor
Totales	18	185	7.140,26	10.26	72.46	

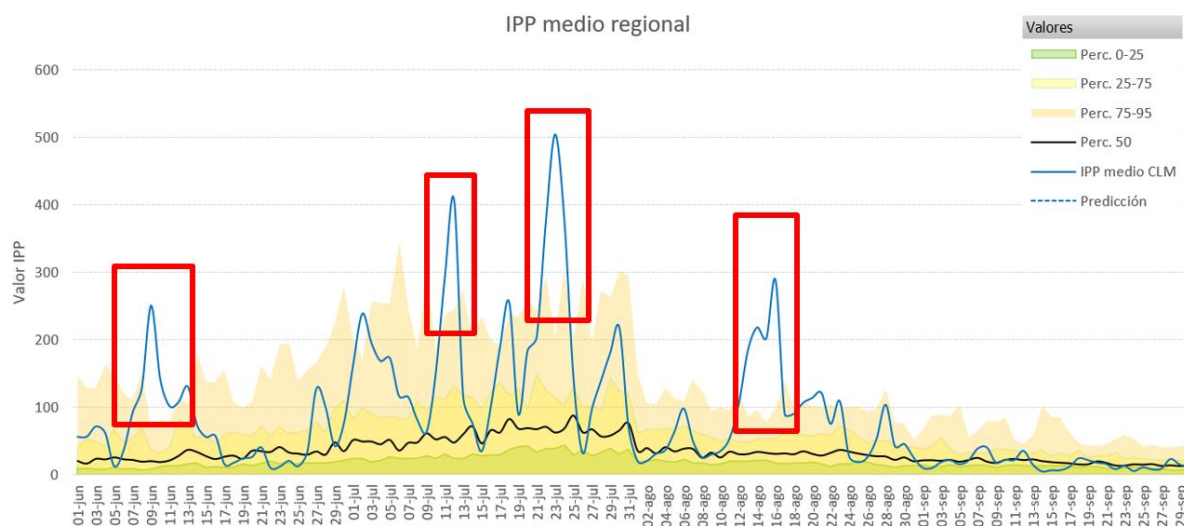


Figura 16. Evolución de los valores del IPP medio a nivel regional con respecto a los percentiles históricos, que permite identificar la ocurrencia de Episodios Adversos durante la época de peligro alto en el año 2021.

5. Discusión

Las principales limitaciones del Índice de Propagación Potencial son:

5.1. El tipo y condiciones del combustible sobre el que los incendios se propagan.

La arquitectura del modelo está diseñada para funcionar con la premisa de que el fuego se propaga sobre un combustible tipo, con una estructura y características determinadas (apartado 3.1.).

Tabla 2. Características de la propagación y respuesta del índice.

ELEMENTO PROPAGADOR DOMINANTE	OTROS COMBUSTIBLES	COMPORTAMIENTO DEL IPP
Combustibles finos muertos (1HR)	Combustibles medios muertos (10HR), sí participan, aportan intensidad.	Comportamiento adecuado. Estructura de combustible de la hipótesis de partida.
	Combustibles vivos, <ul style="list-style-type: none"> - No participan y frenan la propagación (altos contenidos de humedad) - Participación moderada y no alteran sustancialmente las condiciones propagación - Participan activamente y aportan intensidad. 	

Herbáceas secas en pie (1HR) Las condiciones de propagación dependen de la arquitectura del combustible y de los niveles de ventilación.	Otros combustibles (vivos o muertos) de categorías superiores pueden estar presentes y participar en los procesos de combustión, pero no influyen sustancialmente en la propagación que marcan los 1HR	IPP Minusvalora. El índice que informa adecuadamente en este caso es el IPI.
Escenarios con alta carga de combustibles vivos y muertos, y altos niveles de disponibilidad de los combustibles vivos. - Ramillos vivos < 0.6 cm (matorrales, copas) - Ramillos vivos 0.6-2.5 cm (condiciones de muy alta intensidad)	1 HR, 10HR y otros combustibles están presentes y participan en los procesos de combustión. El fuego puede propagar incluso en condiciones ambientales desfavorables (Humedades relativas altas y/o temperaturas bajas)	IPP minusvalora. El principal motor de propagación son los altos niveles de estrés hídrico (sequía). El fuego no responde, o responde poco a cambios meteorológicos desfavorables. El indicador que informa de la posibilidad de este tipo de escenarios es el estrés hídrico.
Propagación por copas	Presentes otros combustibles en estrato superficial, que pueden no tener relevancia en caso de procesos de histéresis.	IPP minusvalora. Niveles de Anomalía Climática muy altos son un buen indicador de que este escenario es posible.
Propagación por mantillo	Presentes otros combustibles que pueden tener distintos niveles de participación.	IPP no informa en este escenario. El indicador adecuado es el Humedad del mantillo (DMC) del FWI

5.2. La bondad de la predicción meteorológica.

Los resultados de la estimación del peligro del IPP dependen la calidad de los pronósticos meteorológicos. Las variables humedad relativa y velocidad del viento, a nivel de superficie no son pronosticadas por los modelos con la misma precisión, que la temperatura. Pequeñas variaciones en estas dos variables pueden conllevar grandes cambios en el valor final del IPP y dar una estimación poco precisa del nivel de peligro.

5.3. Calibrado promedio para toda la región.

Castilla La Mancha es una comunidad autónoma con casi 8 millones de ha. Existen grandes diferencias climáticas entre el este (mayor influencia mediterránea) y el oeste. El calibrado del índice se ha efectuado promediando el conjunto de la región, pero cierto es, que existen diferencias entre los umbrales a los que aparecen los incendios en cuanto al valor del IPP entre el este y oeste.

En el oeste hay cierta tendencia a sobrevalorar (los incendios aparecen con valores ligeramente más altos de IPP)

En el este, existe cierta tendencia a minusvalorar (los incendios aparecen con valores ligeramente más bajos de IPP)

5.4. Agujeros de datos.

La inconsistencia o ausencia en los datos procedentes de la observación, pueden dar lugar a errores en los valores de la Anomalía Climática, que pueden conducir a un valor incorrecto del IPP. Este hecho obliga a un control periódico de los datos obtenidos de las estaciones para comprobar su consistencia y homogeneidad. El reanálisis ERA5 ayuda a solventar este problema intrínseco de la observación. Los reanálisis permiten completar o sustituir aquellas series de datos que no se consideren lo suficientemente consistentes.

6. Conclusiones

El IPP se ha convertido en los últimos años una herramienta imprescindible para el equipo de analistas, pues permite efectuar una estimación objetiva de los niveles de peligro.

El IPP ha dado respuesta a dos de los grandes interrogantes del análisis de incendios, dónde y cuándo, posiblemente se originarán esos incendios que pueden suponer un problema para el dispositivo de extinción. Esto ha supuesto una significativa mejora en la capacidad de anticipación del dispositivo.

La reconstrucción histórica del IPP ha suministrado información clave sobre los escenarios históricos en los que se han desarrollado algunos de los incendios más relevantes de la región. Conocer el pasado nos permite efectuar proyecciones hacia el futuro y perfilar como podrán ser las condiciones en las que desarrollarán los incendios de los próximos años.

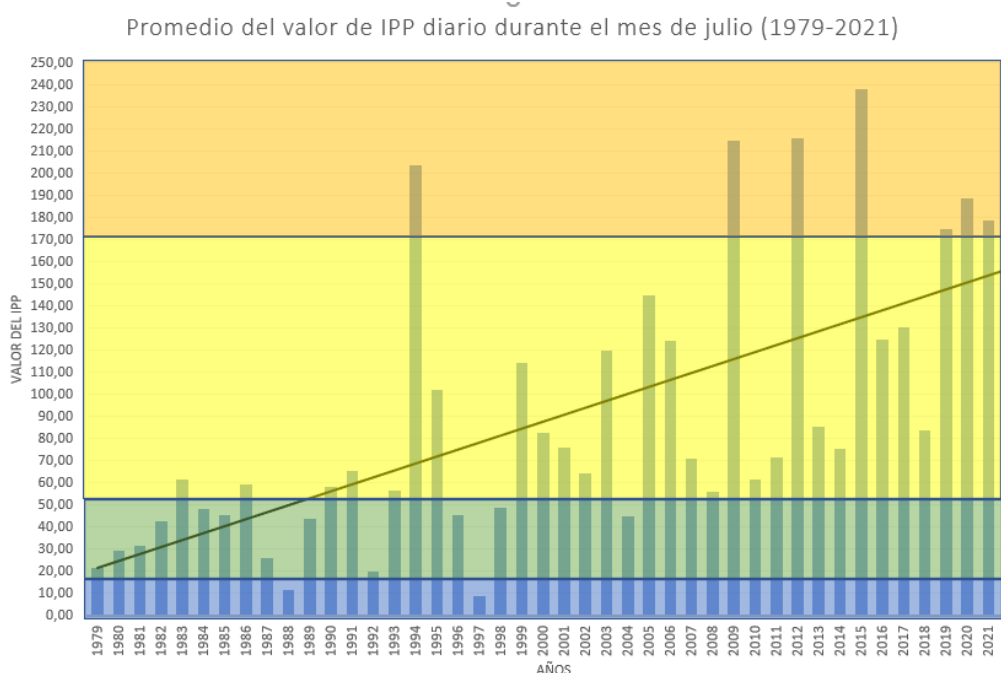


Figura 17. Valor promedio del IPP diario durante el mes de julio. El fondo de color representa los distintos niveles de peligro. El escenario de cambio climático indica una clara tendencia ascendente del valor medio diario en el mes de julio. Nótese que los valores más altos de los años 80 están por debajo que los valores más bajos del último decenio. A partir del año 1999 el nivel de peligro ordinario durante el mes de julio pasa de moderado (verde) a alto (amarillo). Desde el 2019 el valor "normal" del IPP en julio pasa a nivel de peligro muy alto (naranja).

7. Agradecimientos

A Nicolas López Molina, Director del Centro Operativo Regional de Lucha Contra Incendios Forestales por su paciencia y confianza, que me ha permitido invertir todo el tiempo y el esfuerzo necesario en el desarrollo del IPP.

A los componentes de la unidad de análisis y planificación (UNAP).

A Teresa Itziar Rodríguez Urbieto, de la facultad de Ciencias Ambientales de Toledo, por sus aportes, ideas e interés.

A Miguel Angel Rodríguez Hidalgo, Director del Centro Operativo Provincial de Albacete, por su visión siempre crítica y constructiva.

A Juan Pedro García Alonso, director del Centro Operativo Provincial de Ciudad Real, por su apoyo y confianza.

8. Bibliografía

ARNALDOS VIGER, J; NAVALÓN NONELL, X.; PASTOR FERRER, E.; PLANAS CUCHI, E; ZÁRATE LÓPEZ, L. Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. Cap. 9. Ed. Mundi-Prensa.

BYRAM, G.M.; 1959. Combustion of forest fuels. A forest fire control and use. Ed. K.P. Davis. McGraw-Hill. New York.

COEHN, J.D.; DEEMING, J.E.; 1985. National Fire Danger Rating System: Basics Equations. General Technical Report PSW-82. USDA.

Fosberg, M. A., and J. E. Deeming, 1971. Derivation of the 1- and 10-hour timelag fuel moisture calculations for fire-danger rating, USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station.

Urbieto, I. R.; Zavala, G; Bedia, J; Gutiérrez, JM; San Miguel-Ayán, J; Camia, A; Keeley, J.E; Moreno, JM. 2015. Fire activity as a function of fire-weather seasonal severity and antecedent climate across spatial scales in southern Europe and Pacific western USA. Environ. Research. Letter. 10 114013

MCELHINNY, M.; BECKERS, J.F.; HANES, C.; FLANNIGAN, M.; JAIN, P. 2020. A high-resolution reanalysis of global fire weather from 1979 to 2018 – Overwintering the Drought Code. Earth System Science Data.

Nelson R.M., Jr. 2000. Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content, Canadian Journal of Forest Research.

ROTHERMEL, R.; 1983. How to predict the spread and Intensity of forest and range fires. General Technical Report INT-143. USDA.

ROTHERMEL, R; WILSON, R. A.; MORRIS, G.; SACKETT, S; 1986. Modeling moisture content of fine dead wildland fuels; input to the behave fire prediction system, Research paper INT-359. USDA.

ROTHERMEL, R; 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research paper INT-115. USDA Forest Service.

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, Pacific Forest Research Center, Victoria, BC, BC-X-177.