

VIGILANCIA DEL RIESGO DE OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE SUPERFICIE

I. M. Domínguez-Hurtado¹; A. S. Moya-Álvarez¹;
A. Estrada-Moreno¹

¹Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.
Correo-e: ismabel.dominguez@vcl.insmet.cu

RESUMEN

Para la estimación del riesgo de ocurrencia de incendios forestales se emplean diferentes variantes a nivel mundial, en este trabajo se propone un sistema de vigilancia para la detección del riesgo de ocurrencia de incendios forestales a partir de la información procedente de estaciones meteorológicas de superficie, debido básicamente a la carencia de salidas operativas diarias que evaluarán las condiciones de riesgo de fuegos a nivel nacional. Se emplearon los índices de Nesterov modificado y Monte Alegre, los cuales se estimaron a partir de los datos procedentes de las 68 estaciones meteorológicas de Cuba. A partir de dicha información se obtiene la salida mapeada diaria de cada uno de ellos, mediante la utilización de la técnica de interpolación bicubic spline. Se obtuvo un sistema operativo totalmente automatizado para la evaluación de las condiciones de riesgo de ocurrencia de incendios para Cuba, el cual brinda la posibilidad de completar y perfeccionar el sistema de vigilancia de fuegos, basado en la reducción de la escala temporal y el tratamiento de la información.

PALABRAS CLAVE: incendios forestales, vigilancia, información meteorológica.

SURVEILLANCE OF OCCURRENCE OF FOREST FIRES FROM WEATHER STATIONS

SUMMARY

It is proposed a surveillance system to detect the risk of occurrence of forest fires on the basis of information from meteorological stations, due mainly to lack of operational daily departures to assess the conditions of risk of fires nationwide. Rates were used Nesterov amended and Monte Alegre, which were estimated from data from the 68 meteorological stations in Cuba. From that information is obtained mapeada daily output of each of them, using the technique of bicubic spline interpolation. We obtained an operating system for fully automated evaluation of the risk of occurrence of fires to Cuba, which has the potential to supplement and perfect the system for monitoring fires, based on reducing the time scale and the treatment of information.

KEY WORDS: forest fires, weather information, index.

INTRODUCCIÓN

El servicio agrometeorológico tiene como misión fundamental estudiar la influencia del tiempo meteorológico y el clima sobre el crecimiento, el desarrollo y productividad de los cultivos agrícolas, la silvicultura y los animales de crianza. Con los resultados de estas investigaciones, se establece un sistema de información operativa mediante boletines, informes especiales, vigilancia agrometeorológica y emisión de avisos tempranos de alerta dirigidos a especialistas y dirigentes de la agricultura, de manera que les permitan aprovechar de una forma adecuada las

condiciones favorables del tiempo y del clima y minimizar las pérdidas cuando estas condiciones sean desfavorables

Dentro de aquellos eventos causantes de pérdidas agrícolas, se encuentran los incendios. Si bien los fuegos forman parte de las características normales de varios ecosistemas en el mundo, desde el punto de vista agroproductivo, resulta uno de los principales siniestros que atentan contra el desarrollo no solo de plantaciones forestales, sino de otros cultivos, como pueden ser pastos, caña de azúcar entre otros (Domínguez *et al.*, 2003).

Cuba, de acuerdo con el Departamento de Ordenación Forestal del Ministerio de la Agricultura contaba al cierre de 2006 con 2,741.3 miles de ha de bosques, lo que representa el 24.9 % de la superficie del país. Sin embargo, en este mismo período se reportaron un total de 338 incendios, con 10,4327 ha afectadas; de los cuales 34 siniestros (326 ha) fueron originados naturalmente, 278 (8,550 ha) por fuentes humanas y 26 (1,560 ha) sin causas determinadas (Cuba. Cuerpo de Guardabosques, 2006). Los elementos anteriores llevan a considerar la importancia de un sistema de protección eficiente que permita reducir la ocurrencia y propagación de los incendios forestales. Actualmente, en Cuba la vigilancia del riesgo de ocurrencia de incendios rurales se basa en la combinación de varios métodos que van desde el cálculo de índices agrometeorológicos ajustados a las particularidades nacionales, hasta, el caso específico de las distintas categorías de áreas protegidas, el uso de la teledetección mediante la colaboración internacional (Brasil, Ministerio da Ciencia e Tecnología, 2008). Sin embargo, las escalas temporales de las salidas gráficas corresponden al formato decadal (diez días) (Cuba, Centro Nacional de Meteorología Agrícola, 2008), enfocadas sobre todo al diagnóstico de la situación.

Ante la carencia de un sistema operativo y totalmente automatizado para la evaluación diaria de riesgo, una de las limitaciones actuales para la vigilancia de incendios, se evidencia la necesidad de perfeccionar este sistema con el fin de desarrollar acciones de prevención y extinción de incendios forestales con la mayor eficacia posible.

De ahí que el presente estudio se traza como objetivo proponer un sistema de vigilancia para la detección del riesgo de ocurrencia de incendios forestales en Cuba a partir de la información procedente de estaciones meteorológicas de superficie.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en el Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, mediante la acción conjunta del Departamento de Agrometeorología y el grupo de predicción del tiempo.

Descripción del área de estudio

El área de estudio comprende todo el archipiélago cubano, el que constituye la porción occidental del arco insular antillano, en medio de los continentes de América del Norte y América del Sur. Está formado por la Isla de Cuba, Isla de la Juventud y otras 1,600 isletas y cayos (Negrín *et al.*, 2000).

La máxima distancia entre las costas norte y sur es de 191 km y la más estrecha es de apenas 31 km. Posee trece bahías de importancia y 635 cuencas hidrográficas de variable extensión (Negrín *et al.*, 2000).

El territorio está distribuido, según la división político-administrativa de 1975, en 14 provincias y 169 municipios, incluyendo el municipio especial Isla de la Juventud. Desde el punto de vista geográfico, se reconocen tres zonas: Occidente (porción oeste del territorio), Centro y Oriente (porción este) (Negrín *et al.*, 2000).

Cuba dispone de grandes cantidades anuales de radiación solar global. La marcha de este elemento a través del año muestra máximos en abril y julio, superiores a los 20 MJ m², y mínimos en diciembre y enero, inferiores a los 12 MJ m² (Cuba, Instituto de Meteorología, 2008).

La insolación también alcanza altos valores, anuales de aproximadamente 2,900 horas luz en las costas e inferiores a las 2,500 horas luz en las montañas (Cuba, Instituto de Meteorología, 2008).

Los valores medios anuales de la temperatura oscilan desde 24 a 26 °C en las llanuras, hasta 26 °C y más en las costas orientales, observándose una disminución de los valores de esta variable en las áreas correspondientes a los sistemas montañosos principales del país, descendiendo incluso a magnitudes inferiores a 20 °C en la parte más alta de la Sierra Maestra. En invierno (enero), oscilan, como promedio, entre 20 y 22 °C en las regiones occidental y central, y entre 22 y 24 °C en la oriental; mientras que en verano (julio), están entre 26 y 28 °C en la mayor parte del país y a más de 28 °C en las costas de la región oriental (Cuba, Instituto de Meteorología, 2008).

El elemento que más varía en el clima, es la lluvia. El acumulado medio anual es de 1,375 mm. En la mayor parte del territorio, el año se divide en dos períodos estacionales, el lluvioso (de mayo a octubre) y el poco lluvioso (de noviembre a abril). En el primero, se registra aproximadamente 80 % del total de lluvia anual, y en el segundo, 20 % restante. En el nordeste de la región oriental y zonas montañosas de la misma, los acumulados en ambos períodos estacionales son similares, dadas las particularidades de la circulación atmosférica invernal y la orografía en el área. Allí se localizan las zonas donde más llueve (más de 3,000 mm anuales), mientras que en todo el litoral sur de Santiago y Guantánamo, a sotavento de la Sierra Maestra y del Grupo Sagua-Baracoa, se registran los valores más bajos del país, con 600 mm de lluvia. Otras zonas con registros relativamente bajos de lluvia son la costa norte de Camagüey (incluyendo los cayos), Holguín y Las Tunas, costa sur de Cienfuegos y Sancti Spiritus, y suroeste de Pinar del Río. Aunque la variabilidad de la lluvia es mayor en el período poco lluvioso, el impacto socioeconómico de la irregularidad de la lluvia en la temporada lluviosa es mucho más importante (Cuba, Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología, 2008).

La humedad relativa es normalmente alta, con valores por encima de 60 %. Los máximos diarios ocurren a la salida del sol (en ocasiones llega a ser superior a 95 %), más

altos, en las zonas montañosas y en el interior del país. Los mínimos (al mediodía) se ubican en las costas, disminuyendo hasta aproximadamente 60 % en el interior del territorio. Los meses más húmedos son septiembre y octubre, y los menos húmedos abril y marzo (Cuba, Instituto de Meteorología, 2008).

El viento predomina del este en casi todo el país, girando del NE al E de mayo a octubre, y pueden rotar al SE en caso de retraimiento del centro anticiclónico oceánico; de noviembre a abril, los rumbos más frecuentes son del primer cuadrante, debido a la afectación de los organismos propios de la circulación invernal. Las velocidades máximas del viento, sobre el país o por sus inmediaciones, se deben al paso de frentes fríos, ciclones extratropicales, tormentas locales severas y ciclones tropicales (Cuba, Instituto de Meteorología, 2008).

La evaporación es alta, con valores de hasta 2,300 mm en el Valle del Río Cauto y en la costa sur de Guantánamo. Las magnitudes más bajas de este importante componente del balance hídrico corresponden a las regiones montañosas, donde alcanzan alrededor de los 1,100 mm anuales (Cuba, Instituto de Meteorología, 2008).

En cuanto a la fauna, flora y vegetación, tal y como se describe en el estudio de país sobre biodiversidad (Cuba, 1997), se conocen 16,579 especies de la fauna: 42 de mamíferos, 350 de aves, 121 de reptiles, 46 de anfibios, 2,947 de moluscos, 7,493 de insectos y 1,300 de arácnidos. Su rasgo más sobresaliente es la extrema pobreza de algunos grupos, básicamente los mamíferos, así como la ausencia de mamíferos terrestres de gran talla.

Por las características de la flora y de la vegetación, el territorio cubano constituye una provincia geobotánica o subdominio fitogeográfico de la subregión Caribe o Centroamericano-antillana (Cuba, 1997).

Del total de especies que forman la flora natural de nuestro país, más de 6,000, 51 % es endémica, lo que implica que Cuba es el principal centro de especialización de las Antillas, debido al tamaño de la Isla y al aislamiento geológico acontecido desde principios del Terciario. En nuestro país, aparecen 33 áreas de alto endemismo (Cuba, 2008).

En el Catálogo de Plantas Cubanas Amenazadas o Extinguidas (Borhidi y Muñiz, 1983) aparecen 994 especies en peligro, correspondientes a 381 géneros y 105 familias, incluidas 832 endémicas, que constituyen 86.7 % de las catalogadas. Se registra la extinción de 13 especies endémicas.

En menos de 200 años, entre los siglos XVIII y XX, Cuba experimentó un fuerte decrecimiento de la superficie boscosa. Perdió, en ese período, alrededor de 8 millones

de ha de bosques, en su mayoría primarios, con una alta diversidad de especies preciosas. A partir de 1960, la recuperación y conservación de la cubierta forestal, que promovió la Revolución, representó un viraje en el proceso de destrucción de ese recurso y después de cuatro décadas de intenso trabajo en la esfera, el país ha incrementado 7 % la cubierta boscosa. En la actualidad, la relación de servicio ambiental, económico y social que prestan los bosques cubanos es de 0.22 ha por habitante.

El área total actual del país cubierta de bosques es de 2,415.9 miles de ha, lo que representa 21 % del territorio nacional, no distribuidas uniformemente. De ellos, aproximadamente 62 % corresponde a bosques productivos y 37.4 % a fines protectores de las cuencas hidrográficas, mantenimiento de la diversidad biológica y la restauración de manglares. El ecosistema de manglar cubre una superficie de 510,000 ha, lo cual representa 26 % de la superficie total de bosques y 4.8 % del territorio del país.

El área forestal potencial es, aproximadamente, 28 % del territorio nacional, con la que se cubrirían todo los suelos de aptitud forestal. Por esa vía, pueden mejorar las condiciones ambientales vinculadas con el recurso forestal y al mismo tiempo, aumentar determinadas producciones para la economía nacional.

La flora forestal autóctona está compuesta por 645 especies arbóreas pertenecientes a 256 géneros, de los cuales 18 especies de 13 géneros se consideran naturalizadas en el país. En las subzonas secas y subhúmedas secas, las cuales constituyen una fuente de endemismo, dadas sus características y particularidades, existen 82 especies de animales y 2 986 especies vegetales, muchas de las cuales constituyen verdaderos indicadores biológicos de los procesos conducentes hacia la desertificación.

Cuba posee colecciones de germoplasma en trece instituciones científicas, que comprenden 19,342 aprobaciones. Existen también cinco jardines botánicos, que abarcan 7,466 taxas.

El país cuenta con un Sistema Nacional de Áreas Protegidas, de las cuales 80 se consideran de importancia nacional y 195 de interés local, siete como regiones especiales de desarrollo sostenible, constituidas por los cuatro macizos montañosos del país, la Ciénaga de Zapata y los dos más grandes sistemas de cayerías (Los Canarreos y Sabana-Camagüey). Entre las áreas protegidas de importancia nacional merecen destacar 14 parques nacionales, las reservas ecológicas y las cuatro reservas de biosfera cubanas: Guanacahabibes, Sierra del Rosario, Baconao y Cuchillas del Toa.

Esta red de áreas protegidas cubre, aproximadamente, 30 % del territorio nacional, en todas sus variantes y

categorias y, aproximadamente, 6.6 %, si se consideran las categorías más estrictas o de importancia nacional (todas las reservas naturales, parques nacionales, reservas ecológicas, algunos elementos naturales destacados, reservas florísticas manejadas y refugios de fauna). Agrupan, en lo fundamental, los mayores valores del país y son representativas de los principales núcleos de biodiversidad y endemismo de Cuba.

Métodos para la estimación del peligro de ocurrencia de incendios forestales:

Para su conformación se seleccionaron los parámetros a programar, basados en dos criterios básicos:

1. Índices nacionalmente aprobados: en este caso se reconocen aquellos homologados y validados por el Centro Nacional de Meteorología Agrícola, perteneciente al Instituto de Meteorología de la República y el Instituto de Investigaciones Forestales y en uso actualmente por el Cuerpo de Guardabosques cubano (Cuba Cuerpo de Guardabosques, 2006; Ramos, 2004).
2. Variables de entrada derivadas directa o indirectamente de las observaciones meteorológicas: Dicha condición garantiza mayor facilidad en el trabajo, debido a que no se emplearían datos procedentes de observaciones realizadas fuera del horario establecido para ello.

De ahí, fueron elegidos los índices de Nesterov modificado y Monte Alegre. La determinación del peligro por el primer método, el cual se utiliza hoy en Cuba, se realizó por la metodología adoptada en 1994 como resultado de investigaciones hechas por el Instituto de Investigaciones Forestales, la cual hace algunas modificaciones a la utilizada antes de ese año:

$$I = \sum_{i=1}^n t_s \cdot (t_s - t_d) \quad (1)$$

Donde:

I = Índice integral de peligrosidad

t_s = Temperatura seca del aire (°C)

t_d = Temperatura del punto de rocío (°C)

n = Número de días consecutivos en los cuáles han caído menos de 10 mm de precipitación.

Este índice es acumulativo. Según el valor de la suma acumulada se obtendrá una categoría (Cuadro 1).

CUADRO 1. Categorías de peligro de incendios según el valor de la suma acumulada obtenida a partir del cálculo del índice de Nesterov modificado.

Categoría	Valor de la suma	
	Desde	Hasta
A	0	500
B	501	1,300
C	1,301	2,500
D	2,501	4,500
E	4,501	

Para el cálculo de la Fórmula de Monte Alegre (Batista *et al.*, 2001), índice acumulativo también, son necesarias dos variables meteorológicas, humedad relativa del aire y precipitación. Esta última se utiliza para establecer las restricciones al cálculo.

La ecuación para el cálculo del índice es la siguiente:

$$FMA = \sum_{i=1}^n \frac{100}{H_i} \quad (2)$$

FMA = Fórmula de Monte Alegre;

H = Humedad Relativa a las 13:00 horas en %;

n = Número de días sin lluvia.

La escala de peligro de la FMA se muestra en el Cuadro 2.

CUADRO 2. Escala de peligro de la FMA.

FMA		Grado de peligro
De	A	
	1.0	Nulo
1.1	3.0	Pequeño
3.1	8.0	Medio
8.1	20.0	Alto
	20.1	Muy alto

Cálculo de los índices de peligro seleccionados

Para calcular el índice de peligrosidad de ocurrencia de incendios rurales se emplearon los datos de las 1300 horas (local) de la red de estaciones meteorológicas de Cuba, 68 en total, disponibles en los servidores del Instituto de Meteorología (Figura 1).

Se decidió emplear una malla con una resolución de 10 km luego de comprobarse que utilizar una de mayor resolución implica un incremento significativo del tiempo de cálculo sin aportar mejoras sustanciales en los resultados.



FIGURA 1. Distribución de la red de estaciones meteorológicas de Cuba.

Lo anterior se debe a que la distancia promedio entre las estaciones meteorológicas de la red nacional es aproximadamente cinco veces mayor a la resolución empleada. El empleo de mallas con resoluciones significativamente mayores a las tomadas con los datos reales iniciales, puede traer como consecuencia la introducción de valores no deseados de las variables por los métodos de interpolación aplicados.

El acceso a la información se realiza a través del protocolo de comunicaciones FTP (*File Transfer Protocol*). Las variables tomadas del mensaje meteorológico son la temperatura del aire, el punto de rocío y la presión atmosférica al nivel de la estación y al nivel medio del mar.

Para obtener la distribución espacial del índice se emplea el pronóstico del campo de presión atmosférica para seis horas del modelo GFS (*Global Forecast System*) para el área (inicialización de las 12 UTC¹). Esta información se utiliza al considerar en el proceso la orografía del terreno con ayuda de la ecuación de estática, concretamente en la obtención de la distribución vertical de la temperatura. Los datos tomados comprenden el área enmarcada entre los 12.5 y 32.5° de latitud norte y entre los 70 y 90° de longitud oeste.

La salida gráfica final del trabajo comprende el área enmarcada entre los 19.74 y 23.43° de latitud norte y entre los 73.86 y los 85.06° de longitud oeste (Figura 2).

Para obtener la distribución espacial de I se tuvo en cuenta la orografía del archipiélago cubano, a través de un algoritmo de cálculo, desarrollado en tres fases:

1. Reducción de los valores de temperatura y de humedad del aire (obtenidos de la red de estaciones meteorológicas pertenecientes al Centro Nacional de Atención a la Red de Estaciones del propio Instituto de Meteorología) al nivel medio del mar, teniendo en cuenta la altura de cada estación.



FIGURA 2. Área que comprende la malla regular de salida gráfica del modelo.

2. Aplicación de un método de análisis matemático para convertir la malla de puntos dispersos que constituye dicha red en una malla regular al nivel medio del mar, que contenga los valores de temperatura y de humedad en cada nodo.
3. Obtención de los nuevos valores de temperatura y de humedad para cada punto de la nueva malla regular, pero teniendo en cuenta la altura de cada nodo sobre el nivel del mar. En este paso se empleó una malla regular de puntos que contiene la orografía del archipiélago cubano con una resolución de 10 km. Esta malla está determinada por 118 puntos en el eje de las X y 44 en el eje de las Y. El mapa de curvas de nivel que representa la orografía cubana, construido a partir de dicha malla se ofrece en la Figura 3.

A continuación se describen cada una de las fases diseñadas:

i. Reducción al nivel medio de los mares de la humedad y de la temperatura registrados en las estaciones meteorológicas.

La red de estaciones de Cuba está distribuida de forma dispersa y a diferentes alturas sobre el nivel del mar, formando una malla irregular de puntos. Para aplicar el algoritmo de

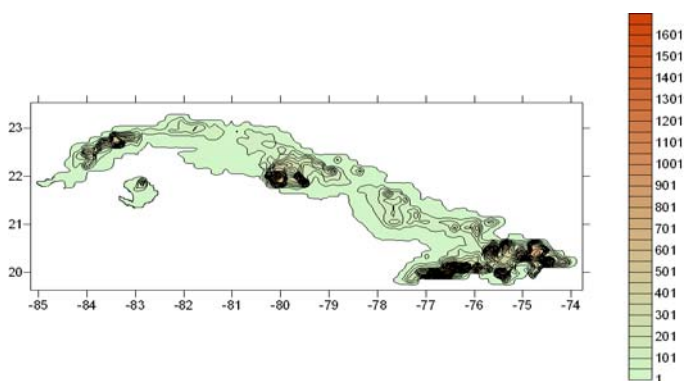


FIGURA 3. Mapa de curvas de nivel que representa la orografía cubana, construido a partir de la malla regular de puntos con alturas sobre el nivel del a una resolución de 10 km.

¹Tiempo universal coordinado o *tiempo civil*, es la zona horaria de referencia respecto a la cual se calculan todas las otras zonas del mundo.

cálculo y ejecutar las salidas gráficas es obvio que se hace necesario convertir dicha malla en una regular, pero que a la vez tome en consideración la orografía del país. Para ello es imprescindible el empleo de métodos de interpolación objetiva, lo que obliga a reducir los valores de las variables tomadas de las estaciones meteorológicas a una altura igual para todas, para lo que se escogió el nivel medio del mar. Una vez interpoladas las variables la tarea consistiría en llevar sus valores a la altura correspondiente de cada nodo de la nueva malla regular, según datos topográficos mostrados en la Figura 3.

Para reducir la temperatura de las estaciones al nivel medio del mar se empleó la ecuación de estática, modificada sobre la base de la ecuación de estado para el aire no saturado (3) propuesta por Matveev (1984):

$$T_0 = -0.06815 \cdot \left(\frac{h_{est}}{\ln\left(\frac{P_1}{P_0}\right)} + 14.6730T_{est} \right) \quad (3)$$

Donde: T_0 , Temperatura reducida al nivel medio del mar (K); T_{est} , Temperatura en el nivel de la estación (K); h_{est} , Altura en el nivel de la estación y P_1 , P_0 Presión al nivel de la estación y reducida al nivel del mar respectivamente (hPa).

Para reducir la humedad al nivel medio del mar se empleó la fórmula de Ziuring (Matveev, 1984):

$$S_0 = \frac{S}{10^{\frac{-h}{9} - \frac{h^2}{120}}} \quad (4)$$

Donde:

$$S = \exp\left(\frac{1936.4 - 235 \cdot \ln(P) + t_d \cdot (25.34 - \ln(P))}{t_d + 235}\right)$$

Humedad específica, calculada a partir de la presión y el punto de rocío al nivel de la estación, obtenida a partir de la fórmula 6 (Moya y Núñez, 2006).

t_d = Temperatura del punto de rocío, tomada directamente de la observación meteorológica.

P = Presión atmosférica al nivel de la estación, tomada de la observación meteorológica.

Una vez reducidos los valores de temperatura y de tensión de saturación al nivel medio del mar se procedió a aplicar un método de análisis matemático objetivo para construir una malla regular para ambas variables,

desarrollada para la misma región geográfica y resolución que se muestran en la Figura 3.

ii. Aplicación de un método de análisis matemático para convertir la malla de puntos dispersos que constituye dicha red en una malla regular al nivel medio del mar, que contenga los valores de temperatura y de humedad en cada nodo.

El método de análisis matemático escogido es el método de Shepard, "quizás la mejor aproximación conocida para solucionar el problema de la interpolación de datos dispersos" (Hoschek y Lasser, 1993). Este fue desarrollado por meteorólogos y geólogos, y todavía se continúa perfeccionando. Consiste en la definición de una función de interpolación $f(x)$ ponderada por sus ordenadas f_i valores de las variables en los puntos dispersos:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \varpi_1(x) f_i \quad (5)$$

$f(x)$ = Función de interpolación que arroja como resultado los valores de la variable en los nuevos puntos como resultado de la interpolación.

N = Cantidad de puntos dispersos.

$f_i = f(x_i)$ - Valores en los puntos dispersos.

$$\varpi_1(x) = \frac{\sigma_1(x)}{\sum_{j=1}^N \sigma_j} = \text{Función que define los pesos en el}$$

proceso de ponderación de los puntos para realizar la interpolación.

$$\sigma_i(x) = \frac{1}{d_i(x)^{\mu_i}} = \frac{1}{\left[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 \right]^{\frac{\mu_i}{2}}} \quad \mu_1 \in \mathfrak{R}^+ \quad - \text{Es}$$

una potencia (μ_i) del inverso de la distancia euclidiana ($d_i(x)$).

Este es un tipo de método de inverso de distancia ponderada, es decir, que entre más grande sea la distancia entre x y x_1 , es menor la influencia que tiene f_i sobre el valor de f en el punto x .

En aras de minimizar la complejidad computacional, tomamos a $\mu_i = \mu = 2$, lo que facilita que no tengamos que calcular la raíz en la expresión (1). Sin embargo, esta selección causa que la distancia entre los puntos tenga una mayor influencia en el algoritmo, lo cual para valores muy grandes de N , puede conducir a inestabilidad numérica. Otra debilidad evidente de este método es que es global, es decir, que la interpolación depende de todos los datos iniciales, lo que no sólo puede conllevar a una gran complejidad computacional sino que además para valores muy grandes de N provoca mal condicionamiento en los

sistemas de ecuaciones a solucionar en el algoritmo (Hoschek y Lasser, 1993).

Atendiendo a que en este caso los puntos dispersos a interpolar sólo ascienden a 68 (cantidad de estaciones en la red nacional de meteorología) y la malla regular a obtener como resultado de la interpolación contiene solamente 118 X 44 puntos (relativamente pocos), el planteamiento anterior deja de constituir un problema, garantizando de esta forma resultados satisfactorios.

iii. Obtención de los nuevos valores de temperatura y de humedad.

Una vez desarrollado el proceso de interpolación se calcularon los valores de temperatura y de humedad específica a la altura sobre el nivel del mar de los nodos de la nueva malla regular, invirtiendo los términos de las fórmulas 2 y 3 respectivamente. El nuevo valor del punto de rocío a la altura sobre el nivel del mar de cada nodo de la malla regular se obtuvo con ayuda de la fórmula 6 (Moya y Núñez, 2006).

$$t_d = \frac{235 \cdot \ln(S \cdot P) - 1936.4}{25.34 - \ln(S \cdot P)} \quad (6)$$

Para obtener la humedad relativa a las 1300 horas se siguió el siguiente algoritmo:

A partir de los valores de temperatura ya obtenidos para los puntos de la malla regular se calculó la tensión de saturación, con ayuda de la fórmula de Goff – Gratch (Matveev, 1984) sobre la superficie del agua (7), adoptada por la OMM (IV CG. Resolución 19, reglamento técnico apéndice C, sección 13). Esta fórmula es exacta para valores positivos de temperatura y muy precisa para valores negativos hasta $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\lg E = 10.79574 \left(1 - \frac{T_1}{T} \right) - 5.02800 \lg \frac{T_1}{T} + 1.50475 \cdot 10^{-4} \left[1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{T_1}{T} - 1 \right)} \right] + 0.42873 \cdot 10^{-3} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{T_1}{T} \right)} - 1 \right] + 0.78614$$

Posteriormente se calculó la tensión de vapor de agua a partir de la fórmula (8) y finalmente se obtuvo la humedad relativa con el empleo de la fórmula 9.

$$e = \frac{S \cdot P}{622} \quad (8)$$

$$Hr = \frac{e}{E} \cdot 100\% \quad (9)$$

La salida de los resultados se realizó a través de mapas que muestran las curvas de nivel de ambos índices (Nesterov y Monte Alegre). Para ello es necesario, en correspondencia con la resolución del mapa base y el área geográfica que éste representa, determinar el valor que toman los índices en la coordenada geográfica asociada al píxel, para luego asignarle un color a este último, de acuerdo con la escala de colores predeterminada. Lo anterior conduce a la necesidad de aplicar un método de interpolación que permita convertir la malla regular de 118 X 44 puntos a una nueva malla regular de 718 X 324 puntos (resolución en píxeles del mapa base).

Para dar solución a esta nueva tarea se aplicó el método de interpolación “*bicubic spline*”, una de las técnicas más empleadas para la obtención de una gran suavidad en la interpolación bidimensional (Press *et al.*, 1992). El método *kriging*, según Solano *et al.* (2003), generalmente se propone como gran interpolador, sin embargo en el manual de usuarios del SURFER (Golden Software Inc., 1999), se explica que con ayuda de los métodos “*spline*” se obtienen resultados con mucha rapidez y sin tanta complejidad, a la vez que son idénticos a los obtenidos por el método *Kriging*. Solano *et al.* (2003), comprobó la realidad de la anterior afirmación mediante varias pruebas realizadas a diferentes conjuntos de datos de lluvia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento de los índices seleccionados se corresponde con los resultados obtenidos por Domínguez *et al.* (2003).

En la etapa 1981 – 1991, entre los meses de febrero a mayo (período de alta peligrosidad), en Cuba ocurrieron aproximadamente el 58 % de los incendios. No obstante, ha quedado establecido que los meses de marzo a abril (máximo peligro), son los que asumen históricamente el 63 % de los que se reportan en el lapso de alta peligrosidad (Ramos, 2004).

Para el análisis de la influencia de las variables meteorológicas se consideró que las mismas, en un fuego, tenía dos momentos de actuación: inicio y propagación. Se observó que la ocurrencia de lluvia es la vía más rápida para cambiar la humedad del material combustible. Desde el punto de vista meteorológico, para estudios más detallados debe

considerarse el número de días con lluvia y el acumulado caído. Por otra parte, la temperatura del aire actúa como factor determinante en la desecación de materiales vegetales e influye en el comportamiento del incendio.

No obstante la reconocida influencia de las variables meteorológicas propiamente dichas sobre los incendios, existen otros elementos meteorológicos que deberán ser considerados, sobre todo aquellos pertenecientes al campo de la meteorología sinóptica. Dentro de ellos se encuentran la ocurrencia de tormentas eléctricas, las cuales aunque no afectan a todo el País por igual, deben considerarse en el estudio. En Pinar del Río la causa más importante en este sentido son los rayos (43.96 %). No obstante, es interesante destacar que en ambos lugares, los incendios originados por quema para limpieza son los que han provocado la mayor cantidad de superficies afectadas (Ramos y Soares, 2004). No obstante, dentro de los mensajes meteorológicos, la información sobre la ocurrencia del fenómeno se encuentra presente, tributa por la observación visual del operador meteorológico.

Como ejemplo de las salidas gráficas obtenidas como consecuencia del procesamiento, en las Figuras 3a y 3b se observan la evaluación de las condiciones

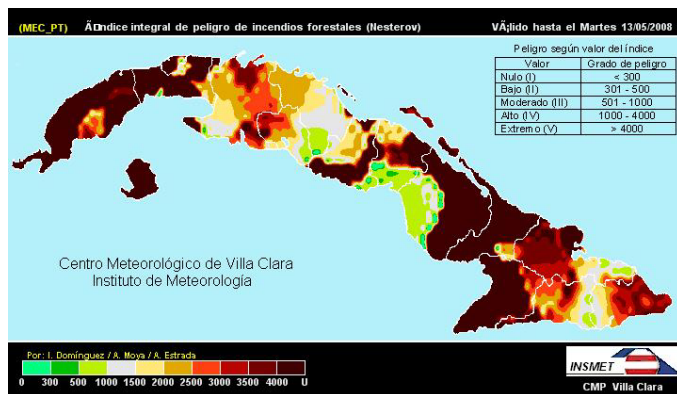


FIGURA 3a. Ejemplo de salida gráfica del índice de Nesterov (13 de mayo de 2008).

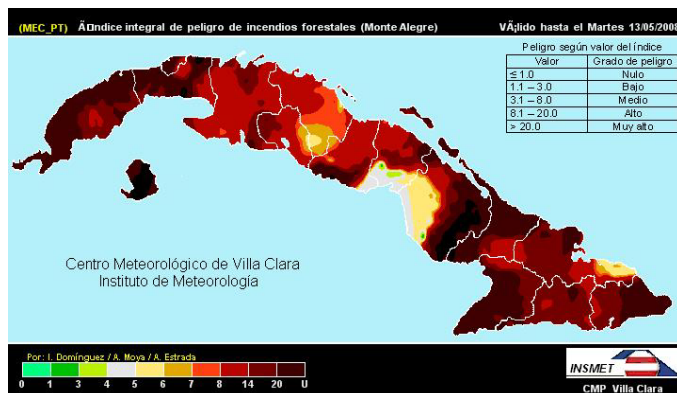


FIGURA 3b. Ejemplo de salida gráfica del índice de Monte Alegre (13 de mayo de 2008).

agrometeorológicas según los índices de Nesterov y Monte Alegre. Estos análisis se distribuyen, mediante un enlace punto a punto o correo electrónico se le suministra a los interesados (dependencias del Ministerio de la Agricultura, principales tenentes del patrimonio forestal, así como el Cuerpo de Guardabosques).

Para la validación de los índices de peligro de ocurrencia de incendios deben considerarse tanto el componente meteorológico como el relativo a las características del área. En el caso de la prevención de los fuegos basados en índices, se hace complejo el proceso si se considera la causalidad, ya que los orígenes tienen distintas. En Cuba, de acuerdo con Ramos (1994), el tipo de negligencia que más incendios originó fueron los fumadores, pero igual que en los casos anteriores, las quemadas agrícolas o ganaderas fueron las responsables de la mayoría de las áreas afectadas correspondiéndole el 78.83 % del total. No obstante, los dos índices seleccionados ya han sido validados por las instituciones mencionadas en el acápite.

MATERIALES Y MÉTODOS

De acuerdo con Reifsnnyder y Alberts (1994), los incendios forestales pueden ocurrir en casi todo tipo de vegetación en el mundo, con la posible excepción de los bosques lluviosos tropicales. En Cuba existen, según Bisse (1988), 17 formaciones forestales que van desde el nivel del mar (manglar) hasta más de 1,700 m (monte fresco), integradas en total por unas 600 especies maderables, las que por presentar algunas de ellas ciertas semejanzas en cuanto a su comportamiento ante el fuego, se agrupan en cuatro clases de peligrosidad (Cuadro 3) según Oharriz (1991). Para hacer esta clasificación los autores plantean que se debe tener en cuenta los aspectos siguientes:

- La composición de las especies arbóreas, arbustivas y del sotobosque.
- Los grupos de edades predominantes, densidad y estado de las masas.
- Características de los suelos.
- El carácter y densidad de las actividades humanas que puedan dar origen a incendios forestales.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización de los incendios en la zona central de Cuba (Villa Clara) en el período 1979 – 2005, se observó que las especies más afectadas fueron el pino, el eucalipto y la casuarina, en lógica correspondencia con la estrategia varietal seguida para el establecimiento de las plantaciones. Además, predominaron los incendios superficiales, donde el material combustible de estos casos lo constituía principalmente el extracto herbáceo. La edad de las plantas afectadas superaba como promedio los dos años, con un valor más frecuente de cuatro años (Dominguez *et al.*, 2003).

CUADRO 3. Clases de peligrosidad según la resistencia natural de la vegetación al fuego.

Clase de peligrosidad	Significación	Formaciones boscosas/Especies importantes. Plantaciones y grupos de edades principales.	Condiciones naturales para el surgimiento y propagación de los incendios forestales.
1ª	Muy peligrosa	Pinares: naturales y plantaciones exóticas: Casuarinas y eucaliptos. Otras plantaciones. Hasta brinzal.	Durante todo el año hay probabilidades de que se produzcan incendios. El daño ocasionado es irreparable.
2ª	Peligrosa	Pinares: naturales y plantaciones exóticas: casuarinas y eucaliptos. Otras plantaciones.	Durante todo el año hay probabilidades de producirse incendios superficiales. El daño ocasionado en general es ligero. En época de intensa sequía pueden producirse incendios de copa con graves daños. En los bosques de casuarina pueden producirse incendios subterráneos.
3ª	Poco peligrosa	Xerófilo típico, cuabal, carrascal, manigua costera, encinar, semicaducifolio sobre suelo calizo, semicaducifolio sobre suelo ácido.	Durante el período de sequía pueden producirse ocasionales incendios superficiales, en raras ocasiones pueden tornarse peligrosos.
4ª	Muy poco peligrosa	Manglares, Xerófilo de mogotes, uveral, semicaducifolio sobre suelo de mal drenaje, pluvisilva, pluvisilva de montaña, montes frescos.	En periodos de sequía extrema pueden producirse raras veces incendios superficiales. En manglares y semicaducifolios sobre mal drenaje pueden el nivel producirse incendios subterráneos cuando el nivel freático baja considerablemente a causa de trabajos de desecación.

Ciertamente, se coincide con Reifsnnyder y Albers (1994) cuando plantean en el caso del índice de Nesterov, que este no tiene en cuenta las variaciones locales de origen topográfico. Además, tanto el índice de Monte Alegre como el propio Nesterov al estar más dirigidos hacia la ocurrencia y no hacia la propagación, no consideran la velocidad del viento, una de las variables que influyen en la magnitud de los siniestros. Este elemento no puede ser obviado en la adopción de decisiones.

En los estudios desarrollados por Zamora *et al.* (2007) se calcularon los índices de peligro de incendios diariamente para el período de ocho años durante los meses de febrero a mayo a través del método de Nesterov y FMA de acuerdo con las metodologías explicadas y se hizo el análisis estadístico correspondiente para determinar la eficiencia de cada uno. Este estudio estuvo basado en un análisis de porcentajes, prueba de Friedman, prueba de Wilcoxon y construcción de dispersogramas.

De acuerdo con los autores, a partir de los índices calculados para cada uno de los días, fue posible agrupar la cantidad de incendios ocurridos en cada una de las categorías del índice por cada uno de los métodos. Así, pudo observarse que en el caso de la Fórmula de Monte Alegre el 86 % de los incendios se agrupan en las clases D y E correspondientes a alto y extremo peligro respectivamente. También es significativo el hecho de que cada vez que el método de la FMA indicó que el peligro era nulo, categoría A, no ocurrieron incendios, lo cual no ocurrió con los otros dos métodos. Los resultados obtenidos por Soares y Paez (1973) citados por Zamora *et al.* (2007) fueron similares para el FMA en la Región Centro-Paranense en Brasil.

CONCLUSIONES

El sistema automatizado obtenido para la vigilancia a corto plazo de los índices de peligro de ocurrencia de incendios forestales en Cuba, mediante el procesamiento de la data procedente de la red de estaciones meteorológicas resulta eficiente desde el punto de vista operativo.

1. Los índices seleccionados para la clasificación del peligro, sin bien brindan una panorámica ajustada a las condiciones observadas, deben ser valorados de acuerdo con las particularidades territoriales, al no considerar elementos que influyen en el inicio y desarrollo de los fuegos.

LITERATURA CITADA

- BATISTA, A. C.; RAMOS M. P.; FIGUEREDO, M. 2001. Manual sobre prevención de incendios forestales. Diseño para una estrategia para el combate de incendios forestales Proyecto TCP/CUB/00066-FAO-Cuba. Marzo-2001. 65 p.
- BISSE, J. 1988. Árboles de Cuba. Editorial Científico Técnica. Ciudad de La Habana. 384 pp.
- BORHIDI, A.; MÚÑIZ, O. 1983. Catálogo de plantas cubanas amenazadas o extinguidas. Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Botánica, La Habana.
- BRASIL, MINISTERIO DA CIENCIA E TECNOLOGIA. 2008. Relatório dos focos nas UCs Federais/Estaduais e Terras Indígenas, Brasília. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. [Fecha de consulta 18 de octubre de 2008], Disponible en <<http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/bduc.html>>.
- CANADIAN FORESTRY SERVICES, 1970. Tables for the Canadian Forest Fires Weather Index. Environmental Canada, Canadian Forestry Service. Forestry Technical Report 25 (4ta edición revisada, 1984).
- CUBA. 1997. Estudio Nacional de Biodiversidad. (M. Vales, A. Álvarez,

- L. Montes y A. Ávila, eds.) 480 pp.
- CUBA. 2008. Panorama medioambiental Cuba 2007. La Habana, Oficina Nacional de Estadísticas (ONE), Edición Mayo de 2008, 71 p.
- CUBA, CENTRO NACIONAL DE METEOROLOGÍA AGRÍCOLA, INSTITUTO DE METEOROLOGÍA. 2008. Boletín Agroclimático. [Fecha de consulta 18 de octubre de 2008], Disponible en <<http://www.insmet.cu/AgroBoletin/agro.htm>>.
- CUBA, CENTRO NACIONAL DEL CLIMA, INSTITUTO DE METEOROLOGÍA. 2008. El Clima de Cuba. [Fecha de consulta 18 de octubre de 2008], Disponible en <<http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=CLIMAC&TB2=clima/ClimaCuba.htm>>.
- CUBA, CUERPO DE GUARDABOSQUES. 2006. Estadísticas de incendios forestales. Departamento de Manejo del Fuego. Jefatura Nacional del Cuerpo de Guardabosques. La Habana. Cuba.
- CUBA, INSTITUTO DE METEOROLOGÍA. 2008. Peligro de incendios forestales. Centro Nacional de Meteorología Agrícola, [Fecha de consulta 18 de octubre de 2008], Disponible en <<http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=INCENDIO>>.
- DOMÍNGUEZ HURTADO, I. M.; PEDRAZA MARTÍNEZ, F. A.; LLANES MORELL, A.; DE LA C. ÁLVAREZ DELGADO, E.; RODRÍGUEZ ROJAS, R.; SAURA GONZÁLEZ, G. 2003. Pronóstico de incendios forestales en Villa Clara. Informe final proyecto CITMA territorial 0615. Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara. 15 p.
- GLOBAL FORECAST SYSTEM 2008. en <http://nomad6.ncep.noaa.gov/ncep_data/index.html> Última actualización del 1 de septiembre de 2006.
- GOLDEN SOFTWARE INC. 1999. SURFER. User' s Guide. Countoring and 3d surface mapping for scientists and engineers. Colorado, USA. 610 p.
- HOSCHEK J.; LASSER D. 1993. Fundamentals of Computer Aided Geometric Design. Ltd. Natick, MA, USA. 727 p.
- MATVEEV L. Rate of the general meteorology. Physics of atmosphere and ocean. L.: Gidrometeoizdat, 1984, 752 pp. (En ruso).
- MOYA ÁLVAREZ, A. S.; NÚÑEZ MATA, E. 2006. La medición de la humedad en Cuba. Problemas y soluciones. Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara: 16 (inédito).
- NEGRÍN SIMEÓN, R. E. *et al.* 2000: en <http://www.medioambiente.cu/deselac/pan_cap1.htm>.
- OHARRIZ, S. 1991. Protección contra incendios forestales. Editorial Pueblo y Educación. Cuba. 76 p.
- ORIEUX, A. 1974: Conditions meteorologiques et incendis en Région méditerranéenne. Revue Forestière Française.
- PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. 1992. Numerical Recipes, 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press.
- RAMOS, M. P. 2004. Manual del uso del fuego y técnicas de prevención de incendios forestales. Proyecto FAO TCP/GUA/2903 (A), Petén, 80 pp. [Fecha de consulta 19 de octubre de 2008], Disponible en <<http://fao.org.gt/archivos/Manual%20de%20Uso%20del%20Fuego%20y%20Tecnicas%20de%20Prevencion%20de%20Incendios%20Forestales.doc>>.
- RAMOS, M. P.; SOARES R. V. 2004. Análisis comparativo entre los incendios forestales en Monte Alegre, Brasil y Pinar del Río, Cuba. Trabajo presentado en el 3° Simposio Sul-Americano sobre Controle de Incêndios Florestais. Curitiba, 14-17 de Junio de 2004.
- REIFSNYDER, W.; ALBERS B. 1994. Systems for evaluating and predicting the effects of the weather and climate on wildland fires, Secretariat of the World Meteorological Organization. Geneva. (Special Environmental Report Núm. 11).
- SOLANO, O.; MENÉNDEZ, C.; VÁZQUEZ, R.; MENÉNDEZ, J.; BURGO, T.; OSORIO, M.; GONZÁLEZ, M. 2003. Zonificación de la precipitación en Cuba. Revista Cubana de Meteorología. Vol. 10, N. 2, p. 9-19.
- ZAMORA GONZÁLEZ, P. R.; RAMOS RODRÍGUEZ, M. P.; DOMÍNGUEZ HURTADO I. M.; HERNÁNDEZ MARTÍNEZ, F., SOTOLONGO SOSPEDRA, R. 2007. Propuesta de un índice meteorológico diario de peligro para elevar la eficacia de la prevención y extinción de los incendios forestales en Santa Clara. Memorias 4to Congreso Forestal de Cuba, La Habana, 1052-1058 pp.