

FireBuster: Una Herramienta Para el Manejo del Fuego¹

John W. Benoit y Shyh-Chin Chen²

Resumen

Desarrollamos un sistema experimental de alta resolución de pronóstico del clima de incendios llamado FireBuster para ayudar al manejo del fuego en California. Este sistema optimiza y automatiza muchos procesos requeridos para entregar oportunamente la inteligencia del clima de incendios. El FireBuster proporciona, de manera rutinaria dos veces por día, pronósticos del clima de 72 horas en tiempo real para California, a una resolución de cuadrículas de 5 km. Los usuarios autorizados pueden seleccionar parte del dominio y solicitar un pronóstico de 72 horas, con una resolución de 1 km, mediante sólo algunos clics. Las salidas del pronóstico incluyen los valores de la temperatura cercana a la superficie, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, precipitación y diversas variables especializadas. Cada corrida del pronóstico (resoluciones de 5 km y 1 km) toma menos de una a dos horas para procesarse en nuestro hardware computacional interno.

El FireBuster entrega información, a medida que cada incremento de 6 horas se completa, a través de un sitio web que despliega visualmente el pronóstico sobre un mapa interactivo. El usuario puede visualizar condiciones meteorológicas futuras hora tras hora a lo largo del dominio completo. Cuando están disponibles, los datos meteorológicos de la red observacional MesoWest pueden ser desplegados para evaluaciones posteriores. Funciones adicionales se están desarrollando, tal como un formato de la salida cuadrículada que puede ser descargado hacia FARSITE, un popular modelo de dispersión de incendios.

El Centro de Coordinación del Área Geográfica del Sur de California (CCAG), que maneja todos los recursos regionales de combate a incendios, es el usuario previsto de este sistema. La colaboración con los meteorólogos de incendios del CCAG nos ha provisto retroalimentación continua sobre la mejor manera de mejorar el FireBuster. La siguiente fase de desarrollo del sistema incluye la adición de índices de riesgo de incendio, perímetros de incendios observados y una capa de datos económicos, de manera que el FireBuster pueda verdaderamente ser parte de una herramienta integrada de manejo del fuego.

Además, desarrollamos un sistema paralelo relacionado, llamado FireBusterSim, para

¹ Una versión resumida de este artículo fue presentada en el Quinto Simposio Internacional sobre Políticas, Planificación y Economía de los Incendios Forestales: Servicios Ambientales e Incendios Forestales, 14-18 de noviembre de 2016, Tegucigalpa, Honduras.

² Especialista en Cómputo y Meteorólogo, respectivamente; USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 4955 Canyon Crest Drive, Riverside, CA 92507, USA; jbenoit@fs.fed.us, schen@fs.fed.us.

examinar la simulación reducida. El FireBusterSim funciona de manera similar al FireBuster, pero produce información meteorológica a escala reducida con base en datos globales de análisis archivados. Ambas, las corridas de modelos cuadrículares de resoluciones de 5 y 1 km, están hechas sobre el área del incendio. La resolución espacial aumentada es mostrada para efectivamente proporcionar mejor precisión en los datos del modelo. Incorporar detalles topográficos más precisos en el modelo mejora la predicción en terreno complejo donde ocurren los incendios a menudo.

Palabras clave: Toma de decisiones, clima de incendios, meteorología, modelo meteorológico de alta resolución, manejo del fuego.

Introducción

El clima es el factor más importante en la determinación del comportamiento del incendio, pero sigue siendo el más difícil de predecir, especialmente a alta resolución sobre terreno complejo. Para pronosticar condiciones meteorológicas futuras, un gerente de distrito contra incendios puede extrapolar las condiciones actuales, dado sólo el clima observado o la climatología. Sin embargo, este método no captura variaciones de la norma, o de eventos climáticos extremos. A menudo es necesario superar esto mediante confiar en la salida de modelos robustos del clima que aún no representan con precisión el área donde están ocurriendo los eventos de incendio. Además, tales modelos no pueden pronosticar en una escala de tiempo que capture la variabilidad diaria de los patrones climáticos locales.

Los modelos meteorológicos de alta resolución pueden proporcionar una mejor imagen de lo que está sucediendo en un terreno complejo para los gerentes de distritos contra incendios y los bomberos. Desafortunadamente, estos modelos pueden ser computacionalmente costosos y requieren de una gran cantidad de tiempo para producir una salida utilizable. Una salida compleja también puede ser difícil de interpretar y requerir de personal especializado para procesarla.

Los gerentes de distritos contra incendios pueden hacer uso de una herramienta de pronóstico del clima de incendios que sea fácil de utilizar, disponible al momento, y que pueda proporcionar información meteorológica de incendios que sea oportuna y detallada. Este artículo describe tal sistema de pronóstico del clima que hemos estado desarrollando llamado FireBuster, que puede ser utilizado operacionalmente por el personal de combate contra incendios.

Objetivos

A pesar de que amplia investigación se condujo al desarrollo de FireBuster, su objetivo final es que se utilice en un entorno operativo. Los objetivos principales del sistema FireBuster son:

- Ser fácil de entender y utilizar por el personal de manejo del fuego, incluyendo meteorólogos de incidentes y bomberos.
- Ser accesible al personal operativo.
- Proporcionar información de clima de incendios de manera oportuna, acertada y detallada.
- Permitir la interacción de tal manera que el usuario pueda extraer información específica para un lugar o tiempo.

El Departamento Forestal y de Protección Contra Incendios de California (CAL FIRE)³, La Región 5⁴ del Servicio forestal de los EE.UU., y otras agencias de manejo del fuego en California son los usuarios previstos.

Metodología

El FireBuster utiliza el modelo de mesoescala espectral (MSM (por sus siglas en inglés), Juang 2000) del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés). El MSM es la versión no hidrostática del Modelo Espectral Regional (MER, Juang y Kanamitsu 1994), la cual ha sido utilizada en muchos de nuestros previos trabajos de modelación regional (p.ej. Chen et al. 1999; Chen et al. 2008; Roads et al. 2010). Los pronósticos son computados para todo California a una resolución de cuadrícula de 5 km. Esto es, los valores pronosticados son producidos para cada cinco kilómetros cuadrados en California. La cuadrícula del dominio mide 243 por 243 celdas cuadradas. El MSM produce un conjunto de cuadrículas de variables meteorológicas para cada hora y hasta 72 horas hacia el futuro. Iniciamos cada pronóstico mediante descargar una parte de la salida diaria del Sistema Global de Pronóstico (GFS, por sus siglas en inglés) del NCEP, el cual tiene una resolución de 0.5° en intervalo de latitud-longitud, y reduciéndola a escala utilizando el MSM. El modelo también puede ser corrido a un tamaño de cuadrícula de 1 km, pero debido a que tomaría un tiempo inaceptablemente largo para procesar toda el área de California a esta resolución, solamente realizamos estas corridas para las áreas y los tiempos, usualmente para eventos de incendios, especificados por el usuario. El dominio para la corrida de 1 km también está reducido a cuadrículas de 96 por 96. Las corridas de pronósticos de 1 km utilizan los pronósticos de 5 km para las

³ Véase <http://www.fire.ca.gov> .

⁴ Véase <http://www.fs.usda.gov/r5> .

condiciones iniciales, de manera que corridas de escala más fina deben anidarse al interior de las más robustas y grandes (Figura 1).



Figura 1: Dominios del modelo de mesoescala utilizado por FireBuster. El dominio de 5 km cubre todo el estado de California (así como el de Nevada). Los pronósticos para el dominio de 5 km son corridos dos veces diariamente. El pronóstico del dominio de 1 km puede ser corrido cuando sea necesario para áreas específicas.

El MSM pronostica varios elementos del clima, incluyendo temperatura, humedad relativa, y dirección y velocidad del viento. También son producidas algunas variables menos comunes, tales como la energía potencial convectiva disponible (EPCD) y la altura de la capa límite planetaria (CLP), que pueden ser de interés para meteorólogos del clima de incendios.

Para determinar qué información pronosticada sería útil para los gerentes de distrito contra incendio, trabajamos con un meteorólogo del clima de incendios con el programa de Servicios Predictivos en el Centro de Coordinación de Área Geográfica (CCAG) del Sur de California. Los 11 CCAG ubicados en los EE.UU. son responsables de asignar los recursos para el combate de incendios del Servicio Forestal a incidentes de incendio. Comprender las futuras condiciones climáticas es fundamental para sus operaciones. El sistema FireBuster está diseñado teniendo en mente las necesidades de los CCAG.

Utilizamos equipo de interiores, un servidor Dell PowerEdge R820, para realizar la reducción de escala y otras tareas computacionales relacionadas (Figura 2). Los pronósticos para el dominio de 5 km se ejecutan dos veces cada día para las 12UTC y 00UTC -a mediodía y medianoche locales, respectivamente- hasta 72 horas. Los pronósticos de 5 km suelen demorar aproximadamente 2 horas en procesarse completamente. Sin embargo, los datos de pronóstico son divididos en archivos que representan incrementos de 6 horas, los cuales están disponibles para su

acceso una vez que estén completos. Cada archivo de incremento es producido cada 8 a 15 minutos durante una corrida. La corrida de pronóstico de 1 km demora aproximadamente 1 hora para procesar un pronóstico de 72 horas. Todos los datos de pronóstico son archivados con fines de análisis.



Figura 2: El modelo de pronóstico de FireBuster se ejecuta sobre un servidor Dell PowerEdge R820 de 40 núcleos. Los sistemas de almacenamiento masivo son utilizados para datos archivados. Otro servidor (no mostrado) convierte la salida del modelo a gráficos visualizables en la web.

La salida del modelo se guarda en formato GRIB, el cual es un formato de almacenamiento de datos utilizado frecuentemente en la comunidad de meteorología. Este formato almacena datos climatológicos en tres dimensiones espaciales así como el tiempo. Sin embargo, extraer datos de GRIB no es fácil sin software especializado. Escribimos un código para extraer datos automáticamente en archivos GRIB de cada corrida de modelo hacia capas de datos representando pronósticos individuales por hora de variables meteorológicas. Estas capas de datos son entonces convertidas en gráficos (imágenes PNG) que son visualizables utilizando un buscador web o un software visualizador de imágenes. La página web, las imágenes y los archivos relacionados son almacenados en un servidor web que es accesible en Internet. Estas imágenes representando variables meteorológicas se muestran semi-transparentemente sobre un fondo interactivo de Google Maps. El mapa puede ser ampliado y explorado de manera similar a la interfaz de Google Maps⁵. El usuario puede controlar cuál hora y elemento del clima pronosticados son desplegados (Figura 3).

Los usuarios autorizados pueden enviar solicitudes de corridas de pronósticos de alta resolución de 1km a través de la página web de FireBuster. Esta función tiene la intención de permitir a los gerentes de distritos contra incendios ejecutar

⁵ <http://maps.google.com>

pronósticos detallados sobre áreas donde se estén produciendo eventos de incendio. La página web se actualiza continuamente mientras el modelo está produciendo las salidas del pronóstico; el usuario no tiene que esperar hasta que el pronóstico se haya concluido completamente para ver la salida. Dada una latitud y longitud, el usuario puede ver fácilmente un pronóstico meteorológico con resolución de 1 km para un área, con frecuencia de cada hora.

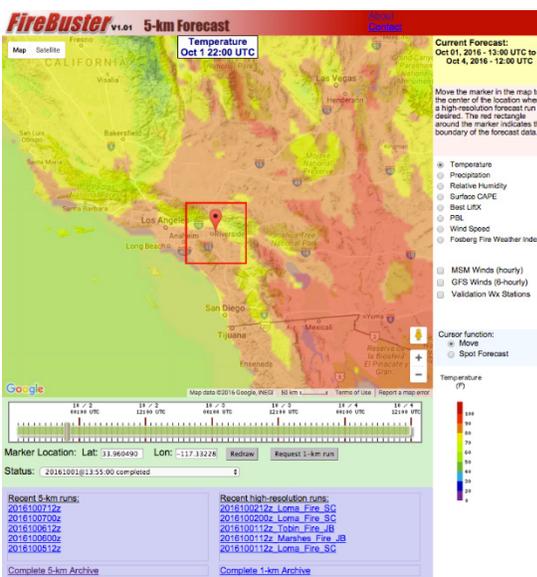


Figura 3: La página web de FireBuster permite al usuario visualizar la salida de la corrida de pronóstico de clima de incendio de 5 km más reciente. Los usuarios autorizados también pueden solicitar corridas especiales de 1 km. Las corridas pasadas están archivadas y disponibles para revisión.

Junto con la producción de pronósticos, hemos automatizado la recopilación de datos meteorológicos observados de un gran número de estaciones a través de California, sobre una base diaria. Los datos provienen de la red de estaciones Mesowest, y están disponibles a través de servicios en línea (MesoWest & SynopticLabs 2016). Revisamos y seleccionamos estaciones de alta calidad para mostrarlas en la página web de FireBuster. Estos datos son reformateados para mostrarlos en la página y se pueden utilizar para la validación del modelo (Figura 4). El usuario puede ver los datos de la estación haciendo clic en una casilla de selección en la página. Los datos de la estación visualizados son de hora en hora, como los datos pronosticados, y consisten en temperatura, humedad relativa y velocidad y dirección del viento. Obviamente, estos datos observados sólo pueden ser graficados para horas pasadas.

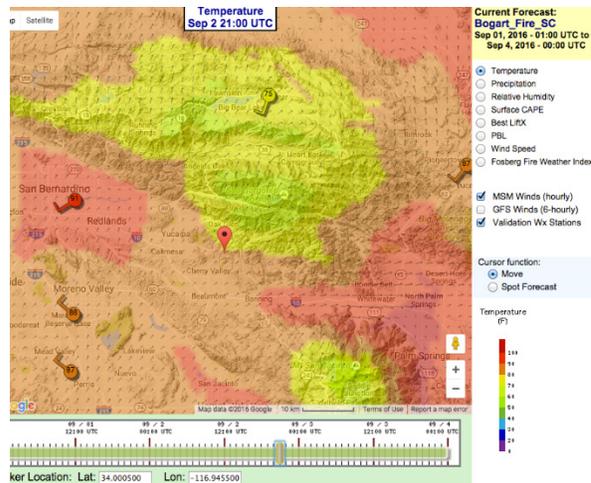


Figura 4: Pronóstico de 1 km para las cercanías de un incendio forestal activo, mostrando las ubicaciones de las estaciones meteorológicas cercanas. Los íconos de estación indican temperatura, dirección del viento y velocidad del viento. Más datos de las estaciones se hacen disponibles mediante hacer clic en los íconos.

Además de visualizar los valores climatológicos sobre un área para cada hora, incluimos una función a la página web para realizar un “pronóstico meteorológico local” para cualquier ubicación sobre el mapa en la que el usuario haga clic. Ello consiste en gráficos en series de tiempo de temperatura e información del viento para una sola ubicación (Figura 5). Si están disponibles, los datos observados desde la estación meteorológica más cercana también son graficados. Esto permite la validación de los valores pronosticados a lo largo del tiempo.

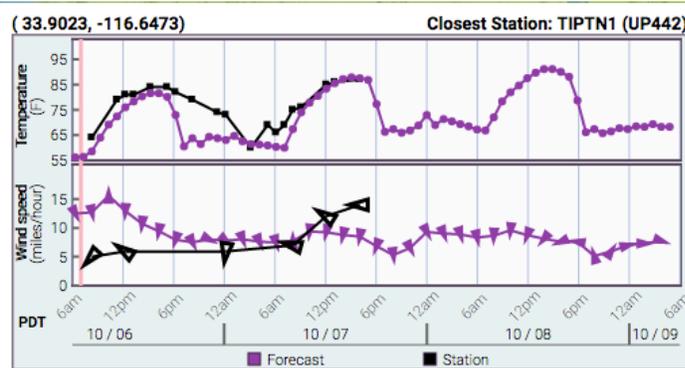


Figura 5: Pronóstico meteorológico local de una sola ubicación en la página web de FireBuster. Se muestran los trazos para todos los valores pronosticados de 72 horas para temperatura y viento (morado). También se muestran los datos observados disponibles de la estación meteorológica más cercana (negro).

A menudo existe interés en examinar escenarios meteorológicos pasados para patrones de mayor resolución. A la par del sistema de predicción del clima de incendios FireBuster, hemos desarrollado un producto similar para analizar datos meteorológicos modelados del pasado, llamado FireBusterSim. El FireBusterSim

proporciona *simulaciones* a escala reducida de los campos meteorológicos en lugar de los pronósticos. La página web es muy similar a la página regular de FireBuster, pero con algunas variaciones. El FireBusterSim utiliza datos archivados del GDAS (*Global Data Assimilation System*) del NCEP para producir clima modelado de escala reducida a una resolución más alta. Esto es útil para estudiar la habilidad añadida del modelo de mesoescala a partir de la salida del modelo más robusto. Podemos utilizar FireBusterSim para conocer más detalles sobre el flujo cercano a la superficie; así como conocer la forma en que contar con un pronóstico de resolución de cuadrícula de 1 km sería más benéfico que contar con el producto de resolución de 5 km.

Estudio de caso: El incendio de Esperanza

Estudiamos la forma en que los datos meteorológicos de alta resolución, como los producidos por el FireBuster y el FireBusterSim, podrían ayudar en un incidente de incendio. Investigamos el incendio de Esperanza de 2006, ocurrido en el Distrito San Jacinto del Bosque Nacional de San Bernardino, en el sur de California. A pesar de que este incendio ocurrió hace varios años, una cantidad importante de datos ha sido recopilada al respecto debido a una investigación sobre las muertes de cinco bomberos durante su supresión. El incendio inició durante las condiciones de Santa Ana –un periodo de vientos fuertes descendiendo desde la Gran Cuenca acompañados de humedades bajas y temperaturas cálidas que es común en el otoño, en el sur de California. La investigación del accidente determinó que el incendio fue impulsado por el viento principalmente, con velocidades de éste de cerca de 40 millas por hora (~64 km por hora), ráfagas cercanas a 60 millas por hora (~96 km por hora), y humedad relativa menor a 10% (Equipo de Investigación de Esperanza, 2007. pág. 65). Imágenes aéreas del incendio (Riggan et al. 2010, Coen y Riggan 2014) mostraron que el incendio inició a avanzar en dirección suroeste durante las primeras horas después de haber sido reportado inicialmente el 26 de octubre de 2006, a la 1:11 a.m. (Figura 6). En última estancia, el incendio creció a 41,000 acres (~16,600 hectáreas).

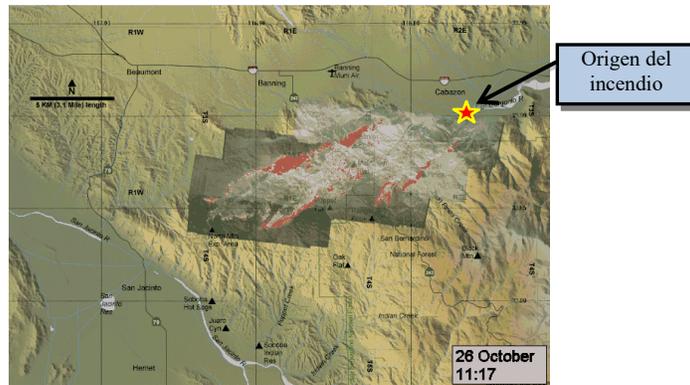


Figura 6: Imagen de FireMapper, un sistema de mapas térmicos aéreos que puede identificar secciones activas de un perímetro de incendio. El incendio de Esperanza se muestra ardiendo predominantemente hacia el suroeste después de las primeras horas.

El incendio de Esperanza ocurrió en terreno escarpado, rugoso, con muchas colinas y cañones. Estas características del terreno serían indetectables a los modelos meteorológicos robustos, sin embargo, estos contribuyen en gran medida al comportamiento del incendio. Por ejemplo, además de las condiciones meteorológicas, un “drenaje de un angosto arroyo sin nombre” contribuyó al comportamiento extremo del incendio cerca del sitio de la muerte de los bomberos:

“Los vientos de Santa Ana se alinearon con el ‘drenaje del arroyo sin nombre’ y la inversión fue penetrada por la elevación térmica de una oleada de fuego que contribuyó al comportamiento extremo del fuego y a la ignición del área”.

(Equipo de Investigación de Esperanza, 2007)

Accedimos a datos archivados del modelo inicial del NCEP para correr el MSM para el tiempo del incendio de Esperanza. Las corridas del FireBusterSim fueron realizadas a resoluciones de cuadrícula de 5 y 1 km. Conforme la resolución incrementa, la topografía tiene una mayor influencia sobre la salida del modelo de mesoescala. Los datos del modelo de 1 km deberían por tanto producir valores de viento y temperatura más realistas en terreno complejo que la versión de 5 km. Se espera que tanto las corridas de 5 y 1 km de FireBusterSim provean salidas más precisas que las de datos archivados del Modelo de Pronóstico Global del NCEP, el cual establece las condiciones iniciales para las corridas del modelo. De manera similar, los *pronósticos* de FireBuster deberían demostrar mayor precisión con resolución aumentada.

Resultados

Realizamos una corrida de 5 km de FireBusterSim iniciada el 25 de octubre de 2006 para capturar las horas de inicio del Incendio de Esperanza. En esta resolución, se tuvieron en cuenta las características generales del terreno. Sin embargo, sobre el paisaje accidentado en el lugar del incendio, la velocidad y la dirección del viento modeladas sólo fueron influenciadas por la topografía de gran escala. El campo general de temperatura también pareció variar sólo ligeramente durante cada hora.

Posteriormente modelamos el área a una resolución de 1 km. En contraste con la corrida de 5 km, los accidentes topográficos parecieron haber afectado los valores de viento y temperatura (Figura 7). Similarmente, pudo observarse mayor variación en la humedad relativa y otras variables en los datos del modelo a escala reducida. La dirección general y velocidad del viento, así como la temperatura producida a resolución de 1 km, coincidieron con las observaciones de dos estaciones meteorológicas en el área. Los vientos de ninguna de las dos resoluciones parecieron explicar la propagación inicial del incendio hacia el suroeste desde el origen; los vientos de la resolución de 5 km eran predominantemente hacia el sur, y los de la resolución de 1 km eran hacia el noroeste durante las primeras horas. Es posible que combustibles (principalmente salvia seca, chamizo y pastos en esta zona), así como la pendiente cuesta arriba impulsaran la dirección de propagación del incendio durante

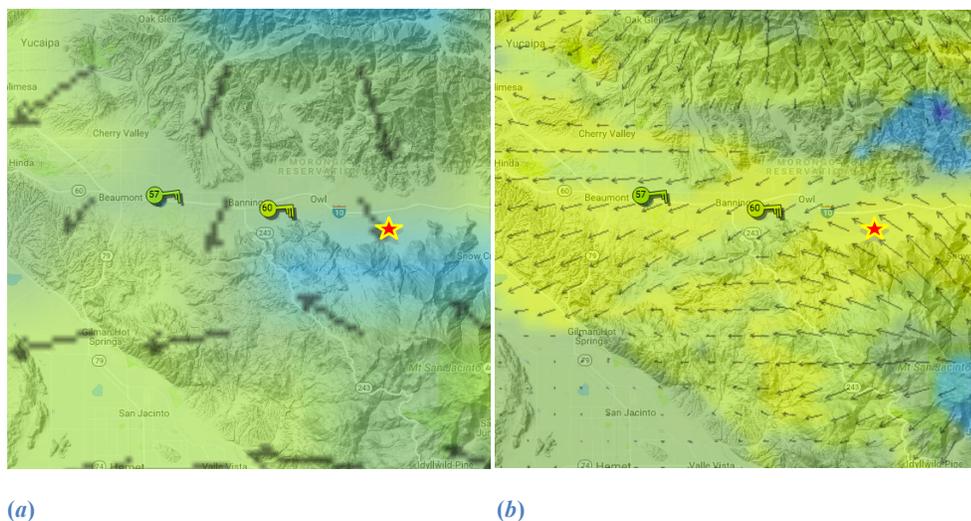


Figura 7: Salidas de los modelos FireBusterSim de 5 km (a) y 1 km (b) para el área del Incendio de Esperanza, para el 26 de octubre de 2006, a las 7 a.m. hora local. El icono de estrella indica la localización aproximada del origen del incendio. Se muestran dos estaciones meteorológicas: Beaumont (izquierda) y Banning (derecha). La corrida de 1 km (b) vectores viento alineados más cercanamente con las estaciones meteorológicas y el avance del incendio (al suroeste) que con la corrida de 5 km. También puede verse más variación en los valores de temperatura en la imagen de 1 km. Nótese que sólo cada tercer vector viento se muestra en las imágenes.

la madrugada. La salida del modelo de 1 km, sin embargo, mostró vientos soplando en dirección suroeste varios kilómetros al oeste del origen del incendio. Además, conforme el día 26 de octubre de 2006 transcurrió, el viento modelado cambió de una dirección noroeste hacia una más orientada al oeste.

Fue posible comparar las variaciones de tiempo para una ubicación fija aleatoria mediante el uso de la función “pronóstico meteorológico local” en la página de FireBusterSim. La comparación de valores de los modelos para la temperatura, velocidad del viento y dirección del viento pudo hacerse con los datos hora-tras-hora observados durante todo el período de la corrida, ya que los datos históricos de la estación se archivan junto con los pronósticos anteriores. Los valores de 5 km y 1 km podrían ser comparados para la misma ubicación para examinar la precisión a lo largo del tiempo (Figura 8). Los valores de temperatura de 1 km parecieron coincidir más cercanamente con los datos observados de las estaciones⁶ que con los de la corrida de 5 km. Del mismo modo, los datos de velocidad y dirección del viento del modelo de 1 km se ajustaron mejor a los datos de la estación que los datos del modelo más robusto.

⁶ De la estación meteorológica Beaumont (RAWS Id: BNTC1), aproximadamente a 3.3 millas (5.4 kilómetros) de distancia.

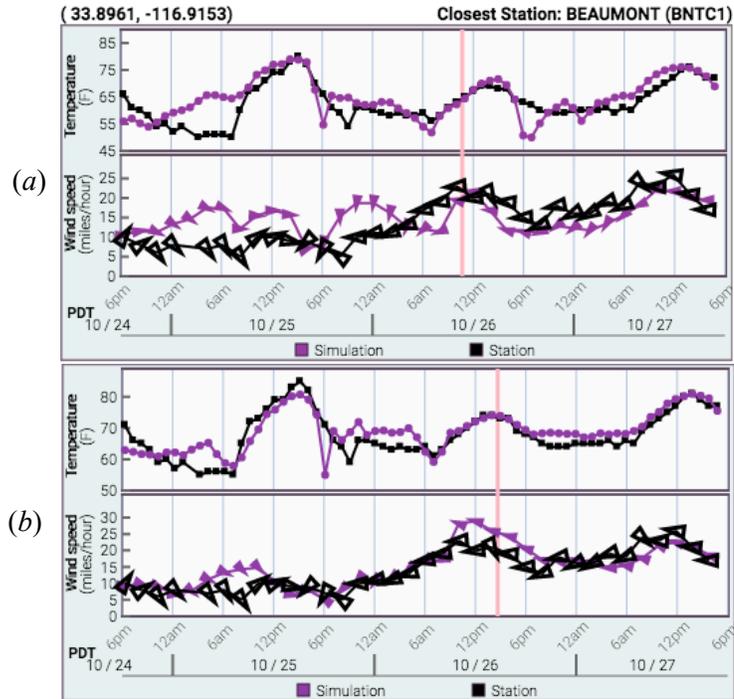


Figura 8: “Pronóstico meteorológico local” (serie de tiempo) de una sola ubicación. El recuadro (a) muestra los valores de FireBusterSim y los observados de temperatura y viento utilizando la resolución de 5 km; el recuadro (b) muestra la resolución de 1 km. Los marcadores triangulares de viento señalan la dirección a la que el viento se dirige.

Discusión

Los avances tecnológicos durante los años recientes nos han permitido producir pronósticos a la resolución de FireBuster en una manera suficientemente oportuna para usarse operacionalmente. Las crecientes velocidades de procesamiento del hardware computacional, la abundancia de datos meteorológicos, y la accesibilidad de la red han contribuido a la construcción de mejores herramientas de manejo del fuego. El FireBuster tiene la meta específica de ayudar a los involucrados en el manejo del fuego. Provee pronósticos del clima de incendios de alta resolución para California, aunque el dominio probablemente puede ser adaptado para cualquier región geográfica a nivel global. Contar con valores de pronóstico a espaciamientos de 5 y 1 km, para cada hora y hasta 72 horas, ofrece una mejoría grande sobre los pronósticos oficiales de escala más robusta. Estos modelos de espectro a mesoescala de mayor resolución incorporan detalles topográficos más finos, permitiéndoles resolver viento, temperatura, y otras variables meteorológicas de incendios en terrenos accidentados donde frecuentemente se necesita combatir incendios.

El FireBuster también puede ser el punto de partida para pronosticar el peligro de incendios con altas resoluciones espaciales y temporales. El sistema de

clasificación de peligro de incendio de los EE.UU. se basa en conocer las condiciones meteorológicas, así como la información de la topografía y de los combustibles para calcular un conjunto de índices que miden el potencial de incendio (Bradshaw et al. 1984, Cohen y Deeming 1985, Deeming et al. 1977). Para el cálculo del peligro de incendio, los valores de humedad de los combustibles también deben ser rastreados diariamente por el FireBuster.

Agregar una capa de datos económicos al sistema puede permitir a los usuarios evaluar el impacto monetario de posibles eventos de incendio (Benoit et al. 2013). Sin embargo, recolectar tales datos a nivel estatal es difícil, puesto que consistirían tanto en valores de mercado, como de no mercado. Los precios de bienes raíces y las cuotas del uso recreativo, entre otros datos económicos necesitarían ser incorporados a la capa de datos, que debería ser periódicamente actualizada. Ha habido discusiones sobre incluir datos económicos al FireBuster en el futuro; sin embargo, probablemente tomaría una cantidad considerable de tiempo para desarrollar por completo esta incorporación.

Actualmente, el FireBuster y el FireBusterSim se están utilizando primordialmente en un entorno de investigación y desarrollo. La comunicación periódica con personal de manejo de incendios proporciona sugerencias sobre mejoras para el sistema. Funciones adicionales se están desarrollando y serán incorporadas próximamente. Debido a su demanda, el sistema FireBuster proporcionará archivos de datos meteorológicos en un formato que pueda ser leído directamente en FASITE, un conocido modelo de propagación de incendios utilizado en los EE.UU. (Finney, 1998). Los perímetros progresivos de incendio de los incendios bien documentados serán convertidos a un formato que pueda ser mostrado en la página web de FireBusterSim. Se está desarrollando una versión móvil de la página web, que permitirá a los usuarios de Smartphone o Tablet visualizar un pronóstico meteorológico local de su ubicación actual. Dicho diseño se dirige a personal de manejo de incendios que cuenten con acceso a Internet para visualizar al instante el clima de incendio en sus áreas. Una versión operacional de FireBuster debería estar disponible el próximo año.

Agradecimientos

El desarrollo del FireBuster fue apoyado por fondos del Centro de Evaluación de Amenazas Ambientales de la Vida Silvestre del Oeste (WWETAC, por sus siglas en inglés), el Programa Conjunto de la Ciencia de Incendios y el Servicio Forestal de los EE.UU. También ofrecemos agradecimientos sinceros a Tom Rolinski (Meteorólogo del Servicio Forestal de los EE.UU. para el CCAG del Sur de California) por su valiosa contribución al desarrollo del Sistema.

Referencias

- Benoit, John W.; González-Cabán, Armando; Fujioka, Francis M.; Chen, Shyh-Chin; Sánchez, José J.** 2013. Spatial allocation of market and nonmarket values in wildland fire management: A case study. In: González-Cabán, Armando, tech. coord. Proceedings of the Fourth International Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: Climate Change and Wildfires. General Technical Report PSW-GTR-245 (English). Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station: 213-224.
- Bradshaw, Larry S.; Deeming, John E.; Burgan, Robert E.; Cohen, Jack D.** 1984. The 1978 National Fire-Danger Rating System: technical documentation. General Technical Report INT-169. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 44 p.
- Chen, Shyh-Chin; Roads, John O.; Juang, Hann-Ming H.; Kanamitsu, Masao.** 1999. Global to regional simulation of California wintertime precipitation. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 104 (D24) 31517-31532.
- Chen, Shyh-Chin; Preisler, Haiganoush K.; Fujioka, Francis; Benoit, John W.; Roads, John O.** 2008. Seasonal Predictions for Wildland Fire Severity. The 3rd International Symposium on Fire Economics, Planning and Policy: Common Problems and Approaches. Carolina, Puerto Rico, April 29-May 2, 2008.
- Coen, Janice L.; Riggan, Philip J.** 2014. Simulation and thermal imaging of the 2006 Esperanza Wildfire in southern California: application of a coupled weather-wildland fire model. *International Journal of Wildland Fire* 23: 755-770. Available at <http://dx.doi.org/10.1071/WF12194> [Verified 13 October 2016].
- Cohen, Jack D.; Deeming, John E.** 1985. The National Fire-Danger Rating System: basic equations. General Technical Report PSW-82. Berkeley, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. 16 p.
- Deeming, John E.; Burgan, Robert E.; Cohen, Jack D.** 1977. The National Fire-Danger Rating System – 1978. General Technical Report INT-39. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 63 p.
- Esperanza Investigation Team.** 2007. Esperanza Fire accident investigation factual report, Riverside County, CA. Available at http://www.fire.ca.gov/fire_protection/downloads/esperanza_00_complete_final_draft_05_01_2007.pdf [Verified 12 October 2016].
- Finney, Mark A.** 1998. FARSITE: Fire Area Simulator—model development and evaluation. Res. Pap. RMRS-RP-4, Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p.
- Google Maps API.** 2016. Google, Inc. <https://developers.google.com/maps/>. Accessed 15 October 2016.
- Juang, Hann-Ming H.** 2000. The NCEP mesoscale spectral model: the revised version of the nonhydrostatic regional spectral model. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 2329-2362.
- Juang, Hann-Ming H.; Kanamitsu, Masao.** 1994. The NMC nested regional spectral model. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 3-26.
- MesoWest & SynopticLabs.** 2016. The University of Utah. <https://synopticlabs.org>. Accessed 13 October 2016.
- Riggan, Philip J.; Wolden, Lynn G.; Tissell, Robert G.; Coen, Janice.** 2010. Remote sensing fire and fuels in southern California. In ‘Proceedings of 3rd Fire Behavior and Fuels

Conference', 25–29 October 2010, Spokane, Washington. International Association of Wildland Fire: Birmingham, AL, USA.

Roads J.; Tripp P.; Juang H.; Wang J.; Fujioka F.; Chen, S.-C. 2010. NCEP/ECPC Monthly to Seasonal US Fire Danger Forecasts. *International Journal of Wildland Fire*, 19, 399-414.

Weise, David R.; Chen, Shyh; Riggan, Philip J.; Fujioka, Francis M. 2007. Using high-resolution weather data to predict fire spread using the FARSITE simulator – a case study in southern California chaparral. In 'Proceedings of the Seventh Symposium on Fire and Forest Meteorology', 23–25 October 2007, Bar Harbor, ME. Paper 8.2. American Meteorological Society: Boston, MA, USA. Available at <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/126873.pdf> [Verified 12 October 2016].

Wildland Fire Assessment System. 2016. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <http://www.wfas.net/>. Accessed 15 October 2016.