

Índice de riesgo de incendio forestal dinámico para la cuenca alta del río Chama

A dynamic risk index for forest fires in the upper watershed of the Chama river

MARILENA YEGUEZ¹
y MAGDIEL ABLAN²

¹ Laboratorio de Prototipos, Universidad Nacional Experimental del Táchira, San Cristóbal, Venezuela, correo electrónico: mariyeg@gmail.com
² Centro de Simulación y Modelos, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, correo electrónico: mablan@ula.ve

Recibido: 11-07-12 / Aceptado: 20-11-12

Resumen

La presente investigación tiene como propósito el desarrollo de un índice de riesgo de incendios forestales dinámico para la cuenca alta del río Chama, ubicada en el estado Mérida - Venezuela, destinado para el uso del grupo de Bomberos Forestales de la universidad de Los Andes (ULA). Se descarta el enfoque clásico o tradicional para la construcción del índice, por requerir datos meteorológicos que no estaban disponibles en la frecuencia y calidad requerida. En su lugar, se calculan índices de estrés de vegetación, a partir de composiciones *Modis Ndvi* para periodos de 16 días. Estos índices se validan usando los datos de los incendios registrados por el grupo de Bomberos Forestales y por el producto *Modis Active Fire*. Los resultados obtenidos sugieren que el índice podría ser útil en la estimación del riesgo de incendios ya que el 73% de los incendios ocurridos en el período considerado fueron identificados en zonas de alto riesgo.

Palabras clave: índice de estrés de vegetación, *Modis active fire*, *Modis Ndvi*.

Abstract

The objective of this research was the development of a dynamic forest fire risk index for the upper watershed of the Chama river in Mérida, Venezuela. The index would be used for the department of forest firefighters of universidad de Los Andes. A traditional meteorological index was dismissed for lack of suitable data. Instead an index was calculated taking into account *Modis Ndvi* compositions. The index was validated using data from *Modis active fire* and from the database of forest-fighters. Results indicated that the index developed may be useful in the estimation of risk since approximately 73% of the fires that occurred in the period were labeled in high risk areas.

Key words: vegetation stress index, *Modis active fire*, *Modis Ndvi*.

1. Introducción

Los incendios forestales son un tipo de incendio que se produce y desarrolla generalmente en zonas de abundante vegetación. Estos incendios se suceden por diferentes causas, provocando daños ecológicos, económicos e incluso la pérdida de vidas humanas. Según Jáuregui (2007), en Mérida el fuego surge por diversas razones. Sin embargo, los datos sobre las causas de los incendios forestales en el estado demuestran que el 76,23% de las mismas son de origen humano, dando pocas oportunidades a las causas naturales.

Los bomberos forestales de la universidad de Los Andes son una organización constituida por un grupo de voluntarios que trabajan arduamente en operaciones de control y extinción de incendios forestales, contribuyendo de esta forma en la re-

ducción del área afectada por incendios. El objetivo general de los bomberos forestales de la ULA es evaluar la problemática de los incendios forestales en el ámbito nacional, sin embargo su radio de acción es principalmente el Eje Chama-Mocotíes. Para Hernández y Balbuena (2001), el eje Chama-Mocotíes tiene un área de 150 km de largo por 2 km de ancho; es decir, aproximadamente 30.000 hectáreas del fondo del valle de las cuencas de los ríos Chama y Mocotíes, ubicados al centro y suroeste del estado Mérida-Venezuela.

Los escasos recursos, tanto humanos como materiales, con los que cuentan los bomberos forestales de la ULA podrían ser optimizados si se dispone de una herramienta que permita ubicarlos de una manera apropiada, minimizando el impacto adverso de los incendios forestales. Esta investigación consistió en el desarrollo de un índice de

riesgo de incendio forestal dinámico que apoye la toma de decisiones respecto a la ubicación de los recursos a corto plazo.

Estimar el riesgo de incendio forestal implica identificar la contribución potencial de variables e integrarlas dentro de una expresión matemática, un índice. Este índice cuantifica e indica el nivel de riesgo. Los índices dinámicos se basan en variables que cambian casi continuamente. Su objetivo es estimar el contenido de agua de la vegetación, o lo que también se conoce como estrés hídrico de la vegetación. Se supone que la vegetación más seca es la más propensa a quemarse. Ya que es difícil y costoso estimar directamente el contenido de agua de la vegetación, variables sustitutas son usadas para estimarlo. Esto se hace a menudo mediante el uso de las variables meteorológicas o mediante el uso de índices de vegetación calculados usando datos de sensores remotos (San Miguel, 2002).

Para la construcción de índices de riesgo de incendio dinámicos, bajo el enfoque clásico o tradicional, se requieren datos meteorológicos de periodicidad por lo menos diaria y con una buena cobertura espacial de la zona de estudio. El ministerio del Poder Popular para el Ambiente calcula, con poca validez para la región andina, el índice de Anstrom para estimar a nivel nacional el peligro de incendios del mes próximo. Dávila (2005) en la cuenca alta del río Caroní aplicó el índice de Monte Alegre, que utiliza la humedad relativa del aire y el número de días sin lluvia, obteniendo buenos resultados. Desafortunadamente, son muy pocas las estaciones meteorológicas operativas en el área de estudio, por lo que esta opción no fue considerada.

Numerosos autores han señalado el interés de utilizar imágenes de satélite para efectuar un seguimiento y valoración del peligro de incendio, principalmente por su capacidad en proporcionar información sobre áreas extensas, a veces inaccesibles, con la frecuencia temporal que requiere esta. Sin embargo, el riesgo obtenido por teledetección no corresponde exactamente con los riesgos típicos considerados habitualmente: ignición, propagación, etc. Es más bien un riesgo derivado de la condición de la vegetación, dado que el sensor informa de la situación de esta y de las condiciones meteorológicas determinadas a partir de las medidas del satélite (Vélez, 2000).

Los índices de vegetación, obtenidos a partir de imágenes satelitales, están diseñados para pro-

veer una comparación permanente y consistente de los cambios temporales y espaciales de la vegetación al responder a la cantidad de radiación fotosintética activa en determinado pixel, al contenido de clorofila, área foliar y a las características estructurales de las plantas (Barona *et al.*, s.f.). Estudios previos han examinado correlaciones entre índices de vegetación y la humedad del combustible vivo. El índice de vegetación de diferencias normalizadas (Ndvi) ha sido el más comúnmente usado en investigación de humedad de combustible vivo (Peterson *et al.*, 2008).

Siguiendo este enfoque, se calculan índices de estrés de vegetación para la temporada de incendios noviembre 2007 – abril 2008, usando el sistema de información geográfica (SIG) software libre gvSIG (<http://www.gvsig.org>) y la biblioteca de algoritmos de análisis espacial libre Sextante (<http://www.sextantegis.com>). Estos índices de riesgo de incendio forestal dinámico se validaron con datos de incendios ocurridos durante la temporada y en el área de estudio. Dicha área abarca parte de la cuenca del río Chama. A partir de un conjunto de puntos proporcionados por el grupo de Bomberos Forestales de la ULA (en coordenadas UTM) se construyó un polígono, este polígono se encuadró dentro de un rectángulo y se extendió el área de estudio a los límites de este último (Figura 1).

2. Materiales y métodos

2.1 Evolución temporal de NDVI

Illera *et al.* (1996) presentan un procedimiento basado en el análisis de la evolución temporal del Ndvi, para evaluar peligro de incendio forestal de larga escala, por medio de imágenes Noaa-Avrrr. Los autores describen el índice de peligro como la suma de las pendientes Ndvi de la temporada de incendios. La ecuación 1 es utilizada para el cálculo de dicho índice.

$$AS_n = \sum_{i=1}^n \frac{NDVI(t_i) - NDVI(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

AS_n = indicador de pendiente acumulada para el período n

t = es el día del año

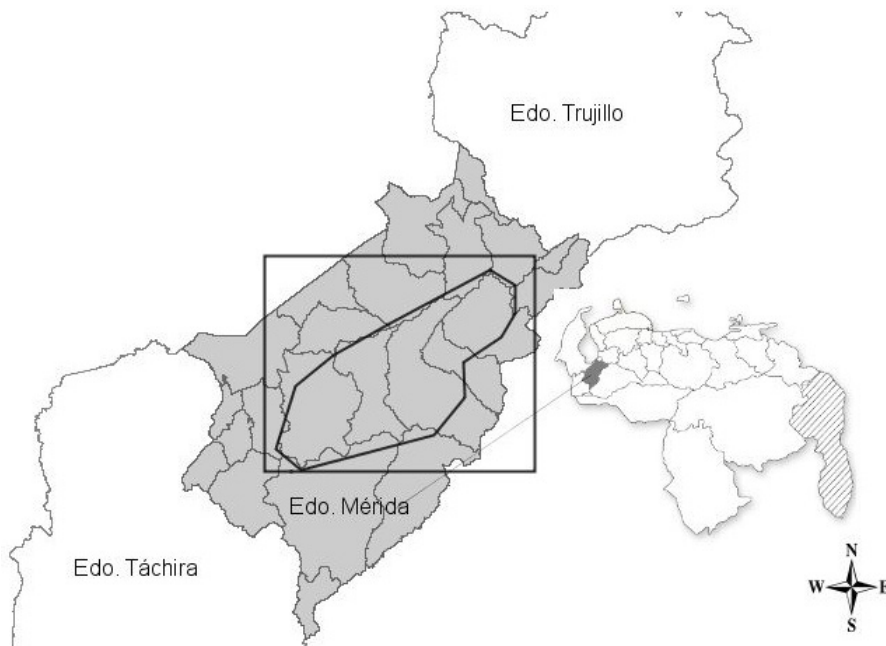


Figura 1. Ubicación y delimitación del área de estudio.

El valor de *AS* es calculado con la frecuencia dada por las composiciones *Ndvi*. Se presume que en áreas forestales el índice presente valores negativos durante los periodos de peligro. También presume que el decremento supone un incremento en el stress hídrico y en consecuencia un incremento en el peligro de incendios.

2.2 Índices de vegetación usando Modis

El sensor Modis (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo de dos satélites (*Terra* y *Aqua*) proporciona imágenes de la superficie entera del globo cada 1 a 2 días. Estas imágenes contienen información de alta sensibilidad radiométrica en 36 bandas espectrales y a tres diferentes resoluciones espaciales: 250 m, 500 m y 1000 m. El área de cobertura es de 10° x 10° divididos en “tiles” o cuadros con una cobertura global (Barona *et al.*, s.f.).

Son dos los índices de vegetación Modis, el clásico índice de vegetación de diferencias normalizadas (*Ndvi*) y uno recientemente desarrollado el índice de vegetación mejorado (*EVI*), que son medidas espectrales de la cantidad de vegetación presente en la tierra. *Modis-Ndvi* describe el verdor relativo de la vegetación de la tierra en una escala de menos uno (-1) a más uno (+1). Las composiciones de 16 días del producto minimizan los proble-

mas de cobertura de nubes sustituyendo un pixel cubierto de nubes con un pixel posterior no contaminado dentro del periodo de los 16 días. Esas composiciones reflejan el estado de la vegetación actual a una resolución temporal suficiente (Neteler, 2004).

Aparte del *Ndvi*, de las imágenes se puede extraer información sobre su calidad, conocida como evaluación científica de la calidad del conjunto de datos (*Quality Assessment Science Data Set, Qasds*). Para Knight *et al.* (2006), *Qasds* proveen una gran cantidad de información relacionada a problemas de calidad potenciales de píxeles *Ndvi* individuales, incluyendo cantidad de aerosol atmosférico, presencia de cobertura de nubes, presencia de cobertura de nieve y hielo, probabilidad de sombra, entre otras. Esta información es resumida en el **índice de utilidad** el cual oscila entre “calidad demasiado baja para ser útil” a “calidad perfecta”.

2.3 Productos Modis active fire

Giglio *et al.* (2003) caracteriza los productos *Modis active fire* como aquellos que proveen información acerca de incendios que arden activamente, siendo la base de estos productos un algoritmo de detección que identifica los incendios activos, dentro de cada banda *Modis*.

La ubicación de un punto de calor/fuego activo *Modis* corresponde al centro de un pixel, de un kilómetro, aproximadamente, que contiene uno o más puntos de calor/incendios que arden activamente. En la mayoría de los casos, los puntos de calor son incendios de vegetación, pero a veces corresponden a una erupción volcánica o el destello de un pozo de gas. No hay forma de saber qué tipo de anomalía térmica se detecta sobre la base únicamente de datos *Modis*. Los atributos de los puntos de calor/fuegos activos son, entre otros: latitud y longitud del punto central del pixel, la fecha de adquisición, la hora del sobrevuelo del satélite, si la detección fue hecha por *Modis-Terra* o *Modis-Aqua*, la confianza de la detección que es una bandera de la calidad del pixel con punto de calor/fuego activo (Fire information for resource management system, 2009).

2.4 Índice de stress de vegetación temporalada noviembre 2007 - abril 2008

Se decidió probar el índice de estrés de vegetación presentado por Illera *et al.* (1995), utilizando imágenes *Modis*. Como se contaba con las composiciones *Modis Ndvi* (16 días) de los años 2007, 2008 y un poco del 2009, facilitadas por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (Ciat), se resuelve trabajar con la temporada de incendios noviembre 2007 - abril 2008. El cuadro 1 lista las composiciones *Ndvi* usadas (identificadas por el año y día juliano correspondiente al primer día del periodo), con su fecha de inicio y fin.

Cuadro 1. Composiciones *Ndvi* usadas para el índice de riesgo de incendios dinámico.

Composición <i>Ndvi</i>	Fecha de inicio	Fecha de finalización
2007-305	01-11-2007	16-11-2007
2007-321	17-11-2007	02-12-2007
2007-337	03-12-2007	18-12-2007
2007-353	19-12-2007	31-12-2007
2008-1	01-01-2008	16-01-2008
2008-17	17-01-2008	01-02-2008
2008-33	02-02-2008	17-02-2008
2008-49	18-02-2008	04-03-2008
2008-65	05-03-2008	20-03-2008
2008-81	21-03-2008	05-04-2008
2008-97	06-04-2008	21-04-2008

La información de calidad de las composicio-

nes *Modis Ndvi*, también facilitada por el Ciat, fue usada para verificar la calidad de las composiciones *Modis Ndvi*. Se usó el módulo *r.bitpattern* del Sig Grass 6.3.0., que permite desarrollar comparación de patrones de bit. Todas las composiciones *Modis Ndvi* facilitadas fueron revisadas y ninguno de sus pixeles obtuvo un índice de utilidad con la descripción: de calidad más baja, de calidad tan baja que no es útil, datos erróneos, o no útil por alguna otra razón/no procesada, por lo que todos los pixeles fueron usados.

Se calculó AS_1 hasta AS_{10} , usando gvSIG y Sextante. Por ejemplo, para calcular AS_1 se desarrolló la ecuación 2:

$$AS_1 = \sum_{i=1}^1 \frac{NDVI(321) - NDVI(305)}{321 - 305} \quad (\text{Ec.2})$$

Las capas AS_n pueden tomar valores tanto positivos como negativos. Recuérdese que se esperan valores negativos para las zonas en riesgo. La capa AS_1 se presenta en la figura 2, a partir de esta capa se crea el índice de riesgo para el período de 16 días comprendido entre el 03-12-2007 y el 18-12-2007. La figura 3 muestra el histograma de AS_1 .

Para calcular AS_2 se usa la ecuación 3:

$$AS_2 = AS_1 + \frac{NDVI(337) - NDVI(321)}{337 - 321} \quad (\text{Ec.3})$$

Con la capa AS_2 se crea el índice de riesgo para el período entre el 19-12-2007 y el 31-12-2007, se procede de forma similar hasta calcular todos los índices. Las AS_n presentan valores tanto positivos como negativos, para muestra la capa AS_9 y su histograma (Figuras 4 y 5).

3. Resultados y discusión

Para validar los índices se requieren datos de los incendios, específicamente, de los que ocurrieron durante la temporada de incendios noviembre 2007 - abril 2008. Los datos de incendios disponibles provienen de las planillas "Informe del Incendio o Conato" registradas por los bomberos forestales de la ULA y del producto *Modis active fire*. Los datos de incendios usados se resumen en el cuadro 2, donde se presenta el número del índice al que corresponde; la confianza, si los incendios provienen

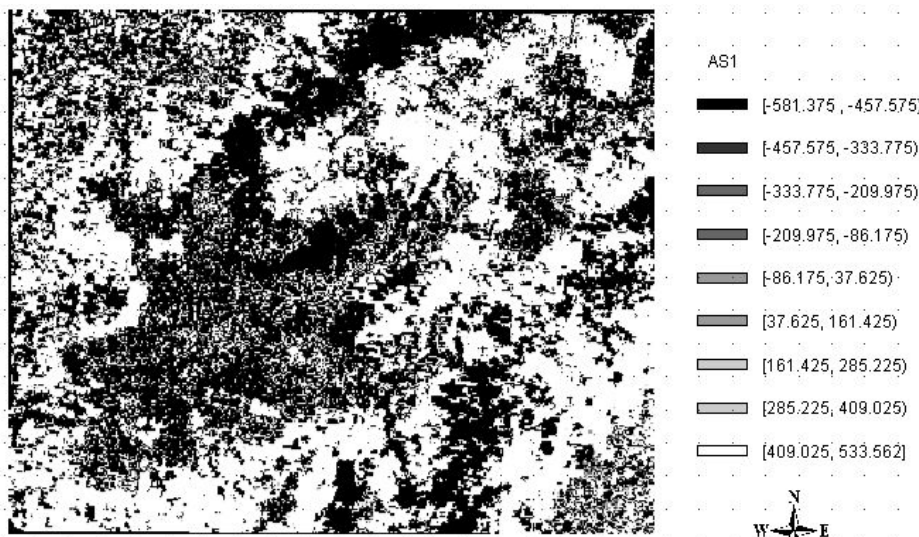


Figura 2. Pendiente acumulada para el período 1 (Capa AS₁).

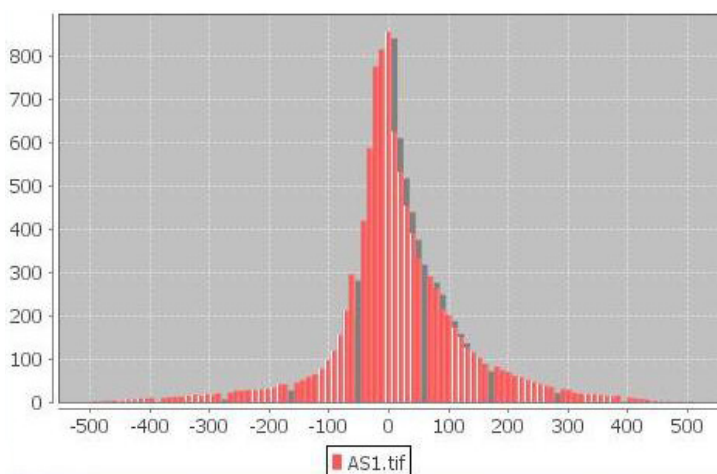


Figura 3. Histograma de la capa AS₁.

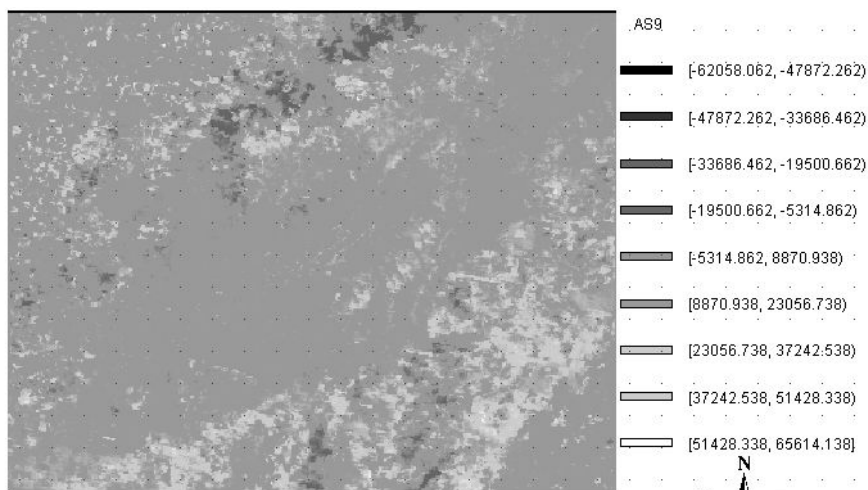


Figura 4. Pendiente acumulada para el período 9 (Capa AS₉).

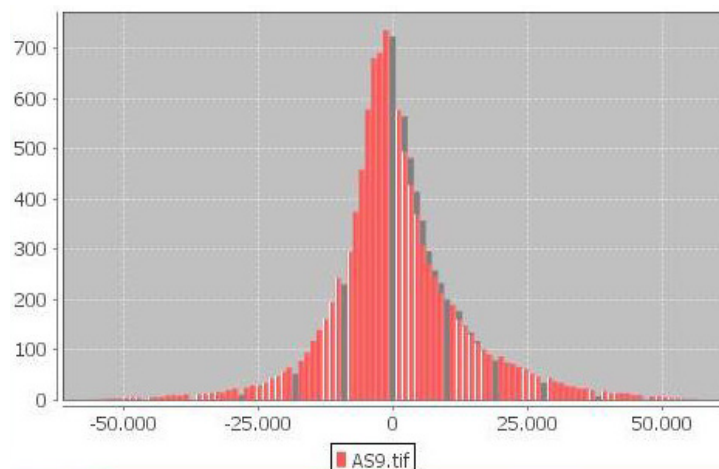


Figura 5. Histograma de la capa AS_9 .

Cuadro 2. Incendios temporada noviembre 2007 - abril 2008.

n	Confianza	Área (ha)	Valor AS_n	Tipo de Vegetación
1	28		-8,68	Urbano
1	29		-28,3125	Sin datos
2	26		-53	Sin datos
3		30	-1,875	Urbano
3	30		-85,8125	Sin datos
3	15		2,8125	Sin datos
4	24		-116,125	Sin datos
4		-	30	Área intervenida
4		0.25	22,875	Urbano
5	42		-364,875	Area intervenida
6	35		-509,4375	Urbano
7	28		-2517,5	Urbane
7	87		700,5625	Area intervened
8	6		4974,3125	Área intervenida
8	79		-241,125	Páramo
8	54		-795,0	Páramo
8	42		-2679,9375	Sin datos
9	68		-2797,25	Área intervenida
9	48		-884,5625	Páramo
9	57		-2625,6875	Páramo
9	89		-413,5	Páramo
9	91		-1141,875	Páramo
9	71		-1392,0	Área intervenida
10	21		-13505,0625	Urbano

del *Modis active fire*; el área, si los incendios fueron registrados por el grupo de bomberos; el valor del índice y el tipo de vegetación según el mapa de vegetación usado.

En su trabajo, Illera *et al.* (1996) usan el índice para estimar la ocurrencia de incendios de gran tamaño, también recomiendan calcular el índice solo en áreas forestales. Por estas razones, se incluye en el cuadro el área afectada por el incendio y el tipo de vegetación donde ocurrió.

Como se puede apreciar, los valores de AS_n son negativos, como se esperaba, salvo cinco casos de un total de 24. También es evidente que la mayoría de los incendios provienen del *Modis active fire*, para los que se desconoce el área afectada.

En la revisión de literatura, no se encontró un valor de confianza límite que permita aceptar o rechazar puntos de calor/fuegos activos, y que pueda ser utilizado en Venezuela. Razón por la que se decidió descartar aquellos puntos de calor/fuegos activos cuya confianza sea menor a 50. En tales circunstancias, el número de valores AS_n positivos se reduce a tres. Dos de estos valores corresponden a incendios registrados por el grupo de bomberos y el otro proviene del producto *Modis active fire*. Dos ocurrieron en áreas intervenidas y uno en una zona urbana.

Se considera prudente, por los pocos datos con que se cuenta, reclasificar los AS_n en dos categorías: Con Riesgo (valores del índice menores a cero) y Sin Riesgo (valores mayores iguales a cero). La figura 6 muestra uno de los índices de stress de vegetación de la temporada de incendios, específicamente el que corresponde al período del 06-04-2008 al 21-04-2008.

Los índices de estrés de vegetación resultantes son aceptables pues estiman el 73% de los incendios

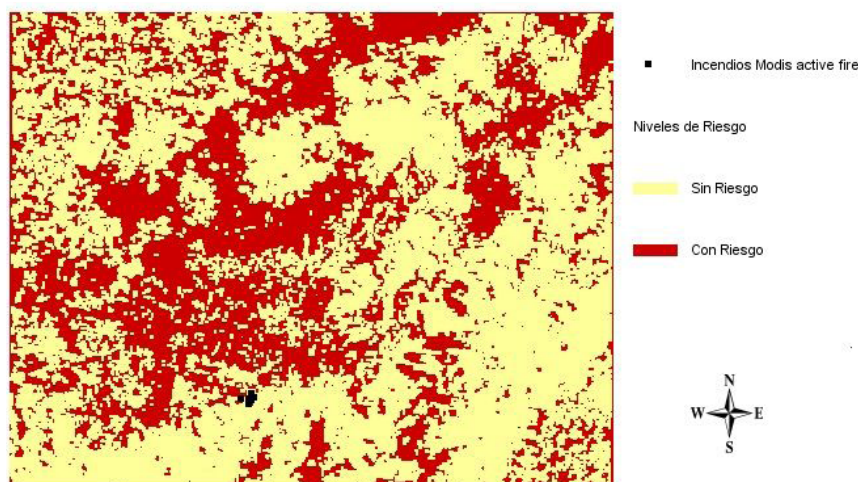


Figura 6. Índice de stress de vegetación para el período del 06-04-2008 al 21-04-2008.

de la temporada, a pesar de no tomarse en cuenta el área afectada por estos. Ya que por su naturaleza, los índices no consideran el factor humano, se esperaba que estimaran un buen número de incendios pero no la totalidad, tal como ha ocurrido.

4. Conclusiones

Las fuentes de datos son escasas, lo que dificulta la construcción y validación de índices de riesgo de incendios dinámicos para la zona. Las imágenes *Modis active fire* fueron de gran ayuda para la validación de los índices, complementaron los datos de incendios registrados por el grupo de Bomberos Forestales de la ULA.

El método seleccionado para la construcción de los índices de riesgo de incendio dinámico, estuvo muy condicionado a los datos disponibles, las composiciones *Modis Ndvi* 16 días. A pesar de esto, los índices de stress de vegetación logrados para el área de estudio, se validan satisfactoriamente. Comparados con el enfoque tradicional, los resultados sugieren que este tipo de índices permite describir mejor la variación espacial del riesgo y pueden ser muy útiles en situaciones donde no se disponga de datos meteorológicos.

5. Agradecimientos

Al Centro Internacional de Agricultura Tropical (Ciat), por su gentileza y por proporcionar las

composiciones *Modis Ndvi* (16 días). Al doctor Alexander Parra, por haber facilitado los datos del producto *Modis active fire*. Y al ingeniero Ramón Jáuregui, por su valiosa colaboración y por proporcionar los datos de los incendios registrados por el grupo de Bomberos Forestales de la Universidad de Los Andes.

6. Referencias bibliográficas

- BARONA, E., E. GIRON, K. FEISTNER, J. DWYER y G. HYMAN. s.f. Método de procesamiento de imágenes MODIS para Colombia. En línea: http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/BaronaMODISprocessing.pdf [Consultado: 10/04/ 2009].
- DÁVILA, M. 2005. Índices predictivos del riesgo de incendios para la cuenca alta del río Caroní. Trabajo de grado. Maestría en Modelado y Simulación de Sistemas. Cesimo, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 180 p.
- FIRE INFORMATION FOR RESOURCE MANAGEMENT SYSTEM. 2009. Frequently Asked Questions. En línea: <http://maps.geog.umd.edu/firms/faq.htm#MODISdetection> [Consultado: 10/04/ 2009].
- GIGLIO, L., J. DESCLOITRES, C.O. JUSTICE y Y. J. KAUFMAN. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment* 87(2-3): 273-282.
- HERNÁNDEZ, E. y J. VALBUENA. 2001. Las amenazas naturales, los riesgos y la vulnerabilidad ambiental del poblamiento en el Eje Chama-Mocotíes. Mérida-Venezuela. IV Simposio internacional de desarrollo

- sustentable en los Andes. 25 de noviembre al 2 de diciembre de 2001. Mérida, Venezuela.
- ILLERA, P., A. FERNÁNDEZ, A. CALLE y J.L. CASANOVA. 1996. Evaluation of forest fire danger in Spain by means of NOAA-AVHR images. *EARSeL Advances in Remote Sensing* 4(4): 33-43.
- JÁUREGUI, R.M. 2007. Causas que inciden en la ocurrencia de incendios forestales en el estado Mérida (1983-2003). *Revista Forestal Venezolana* 1(49): 33-38.
- KNIGHT, J.F., R.L. LUNETTA, J. EDIRIWICKREMA y S. KHORRAM. 2006. Regional Scale Land-Cover Characterization using MODIS-NDVI 250 m Multi-Temporal Imagery: A Phenology Based Approach. *GIScience and Remote Sensing* 43(1): 1-23.
- NETELER, M. 2004. MODIS time series remote sensing for epidemiological modeling. Proceedings of International Symposium on GeoInformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth y Allied Sciences. 16 al 18 de septiembre de 2004. Hanoi, Vietnam.
- PETERSON, S.H., D.A. ROBERTS y P.E. DENNISON. 2008. Mapping live fuel moisture with MODIS data: A multiple regression approach. *Remote Sensing of Environment* 112(12): 4272-4284.
- SAN MIGUEL, J. 2002. Methodologies for the evaluation of forest fire risk: from long-term (static) to dynamic indices. II fuoco in foresta: ecologia e controllo. En línea: <http://www.tesaf.unipd.it/sanvito/dati/Atti%2039mo%20corso.pdf#page=122> [Consultado: 10/02/2009].
- VÉLEZ, R. 2000. *La Defensa Contra Incendios Forestales. Fundamentos y Experiencias*. McGraw-Hill/Interamericana de España. Madrid, España. 129 p.