

Análisis de métodos para la cartografía de incendios forestales en el cantón Cuenca a partir de imágenes TERRA/AQUA MODIS

Cure López Lisseth¹

¹ Departamento de Posgrados/
Universidad del Azuay
Cuenca/Azuay/Ecuador
lichicl@hotmail.com

RESUMEN

La presente investigación explora el potencial de la información satelital para completar y complementar la información disponible en las bases de datos oficiales sobre ocurrencia y localización de incendios forestales en Ecuador. Para ello se aborda un análisis del comportamiento espectral de las zonas quemadas en la región del Azuay y zonas aledañas, a partir de la información contenida en imágenes de resolución espacial baja y temporal alta adquiridas por el sensor MODIS TERRA y AQUA. Los resultados muestran que los productos MOD09A1 (es un compuesto de 16 días que combina información procedente de las plataformas TERRA y AQUA, cuenta con una corrección de la reflectividad en función de las condiciones de observación e iluminación teniendo en cuenta el factor de reflectancia bidireccional que considera la anisotropía (la energía reflejada no es la misma en todas las direcciones, dependiendo del ángulo de observación y de iluminación solar) de las diferentes coberturas del suelo y aplica una corrección para atenuar este efecto), presentan un mejor desempeño al momento de cartografiar áreas quemadas en imágenes recientes post-incendio al ofrecer una mayor separabilidad espectral con otras cubiertas de la imagen. Sin embargo, el producto MCD43A4 (es un compuesto de 16 días que combina información procedente de las plataformas TERRA y AQUA) parece funcionar mejor cuando las imágenes no son recientes. El periodo de estudio fue en el año 2012, año en el cual se presentaron incendios de gran extensión.

Palabras clave: **Área quemada, índices espectrales, incendios forestales, MODIS, teledetección.**

ABSTRACT

The present research explores the potential of satellite information to complete and complement the information available in the official databases on occurrence and location of forest fires in Ecuador. For this, an analysis of the spectral behavior of the burned areas in the Azuay region and surrounding areas is carried out, based on the information contained in low and high temporal spatial resolution images acquired by the MODIS TERRA and AQUA sensor. The results show that the products MOD09A1 (a compound of 16 days that combines information from the platforms TERRA and AQUA, has a correction of the reflectivity depending on the conditions of observation and lighting taking into account the factor of bi-directional reflectance that considers the anisotropy (the reflected energy

is not the same in all directions, depending on the angle of observation and solar illumination) of the different soil coverages and applies a correction to attenuate this effect), present a better performance at the time of mapping Areas burned in recent post-fire images by offering greater spectral separability with other picture decks. However, the product MCD43A4 (is a compound of 16 days that combines information from the platforms TERRA and AQUA). Seems to work best when images are not recent. The study period was in 2012, the year in which fires of great extent occurred.

Keywords: *Burnt area, spectral indexes, forest fires, MODIS, Remote sensing.*

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial los incendios forestales constituyen una catástrofe natural de primera magnitud. Se trata de un fenómeno global que afecta a una gran variedad de ecosistemas en todo el planeta llegando a devastar cerca de 350 millones de hectáreas por año (FAO, 2009). En las últimas décadas, diversos estudios han evidenciado un aumento en la severidad de los incendios forestales y en la superficie afectada en muchas regiones del mundo como América del Norte, Siberia y en el norte de Asia, (Groot et al. 2012).

Entre los efectos adversos de los incendios forestales se encuentra su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero, generando de esta forma una relación estrecha entre el cambio climático y la incidencia de incendios. Se trata de una relación cíclica pues algunos estudios demuestran que el cambio climático provoca, a su vez, una prolongación de las temporadas de incendios forestales a nivel global (Groot et al. 2012). Todo ello evidencia la importancia de contar con información precisa, continua y consistente sobre la ocurrencia de este fenómeno a nivel global pero también, de forma más específica, a escala continental- regional.

Uno de los aspectos más importantes en la gestión de los incendios forestales es la cuantificación de la superficie afectada cada año. En las últimas décadas se han utilizado diferentes técnicas de percepción remota mediante imágenes satelitales con la finalidad de poder identificar, cuantificar y cartografiar las zonas afectadas por incendios forestales (Verdú & Salas 2010). Los cambios que generan los incendios en las cubiertas vegetales: reducción de clorofila y contenido de humedad, incremento de zonas de suelo descubierto, alteraciones del color, deposición de cenizas y carbón, etc.; afectan a su comportamiento espectral, lo que permite diferenciar las áreas quemadas de otros tipos de coberturas existentes en el territorio a partir de imágenes de satélite (Santis & Vaughan 2009).

Imágenes adquiridas desde diversas plataformas y sensores han sido utilizadas para cartografiar áreas quemadas de una forma más económica, accesible y con alta fiabilidad. Además, en el ámbito de los incendios, la información proporcionada por la teledetección ha sido utilizada para la detección temprana de focos activos (Vélez, 2012 en González et al., 2009)

La gran variedad de satélites existentes en el mercado han permitido abordar un buen número de proyectos para cartografiar áreas quemadas a diferentes resoluciones espaciales y temporales, mediante imágenes de resolución espacial baja y alta frecuencia temporal como NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation y TERRA-MODIS, habitualmente utilizados para la detección y cartografía de incendios a escalas continentales (Chuvieco et al., 2006). Otras imágenes, como las adquiridas por la familia de satélites Landsat, que tienen una resolución espacial media-alta, se han utilizado para cartografiar incendios a escalas regionales o locales (Verdú & Salas, 2010)

En el Ecuador no existe un levantamiento sistemático de información in-situ de las áreas afectadas por los incendios

forestales. La información generada es en base a un análisis visual llevado a cabo por las entidades de respuesta y que incluye la localización de un punto de referencia tomado con un GPS, así como la estimación del área y vegetación afectadas. No se han aplicado en Ecuador hasta el momento, técnicas de teledetección para cuantificar, cartografiar y realizar un seguimiento sistemático de la recurrencia de incendios forestales.

En el año 2008 el gobierno ecuatoriano mediante Decreto Ejecutivo 1046-A crea la Secretaría Técnica de Gestión de Riesgos, la misma que toma el nombre de Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos el 18 de septiembre del 2009. Desde esta fecha hasta la actualidad es ésta la entidad encargada de coordinar acciones en respuesta a los diferentes riesgos naturales y a situaciones de emergencia en el país. A nivel de la provincia del Azuay la misma comienza a funcionar a partir del año 2011.

Precisamente en el año 2012, el Ecuador entró en estado de emergencia como consecuencia de la oleada de incendios forestales que afectaron al país. El 14 de septiembre de ese año, 8 de las 24 provincias del país se declararon en alerta naranja. Cerca de 28.000 ha. de bosque y pajonales fueron consumidos por el fuego, de las cuales 2.500 ha fueron pérdidas en la provincia del Azuay. La magnitud de los siniestros fue tal que se recibió ayuda de países como Brasil, Colombia y Venezuela que aportaron recursos en las labores de extinción. Éste sin duda ha sido uno de los años con mayor registro de incendios de las últimas décadas del Ecuador (SNR, 2013).

La Secretaría Nacional de Riesgos (SNR) dirección del Azuay, comenzó en el año 2012 a realizar un monitoreo de los de incendios forestales ocurridos en la provincia, generando una base de datos de siniestros que incluye un punto de ubicación georreferenciado, la fecha del siniestro, las hectáreas afectadas y el uso de suelo afectado. La georreferenciación de los incendios es de carácter aproximado ya que no se realiza un levantamiento in situ del polígono del área afectada, debido a la topografía donde generalmente suceden los mismos, ya que en su mayoría se dan en lugares de muy poca accesibilidad. Por la misma razón tampoco se ha logrado determinar con exactitud el tipo de vegetación afectada en cada siniestro (Base de Datos SNR, 2013.). En la Tabla I se relacionan los incendios forestales mayores a 10 ha que han sido registrados por la Secretaría Nacional de Riesgos para el año 2012.

TABLA I.
INCENDIOS FORESTALES REGISTRADOS POR LA SECRETARÍA NACIONAL DE RIESGOS AÑO 2012

COORDENADAS		PARROQUIA	SECTOR	FECHA	HA. APROX.
X	Y				
722211	9689086	Chiquintad	Tixán	09/08	16
728853	9681614	Chaullabamba	Camino a Nulti	11/08	10
721520	9658396	Cumbe	Américas	22/08	32
673148	9674498	Chaucha	Pichilcay	03/09	1250
722428	9668438	Tarqui	El Calvario	05/09	20
677765	9695405	Molleturo	San Pedro de Yumate	14/09	250
712877	9683412	Sayausí	San Miguel de Putushi - Cruz Quilloloma	16/09	15
725583	9676038	El Valle	Vía a Santa Ana	17/09	10

713247	9662543	Nulti	Ucubamba	21/09	10
719937	9665925	Tarqui	Chilcachaparra	04/10	16

El objetivo de este estudio fue explorar el uso de información satelital para completar y complementar la información disponible en la base de datos de incendios de la SNR mediante la obtención de datos espaciales georreferenciados de las áreas quemadas y cubiertas vegetales afectadas. El propósito del trabajo era determinar la metodología que mejor se ajusta a las características del territorio ecuatoriano.

Para realizar la investigación se debe considerar que las imágenes a ser utilizadas van a definir el alcance de los resultados, debido a que algunas técnicas presentan restricciones derivadas de:

1. La resolución temporal de las imágenes. Resoluciones temporales medias o bajas pueden dificultar la discriminación espectral de las áreas quemadas debido a procesos de recuperación post-incendio que atenúan la señal o incluso impidan la observación del incendio como consecuencias de la cobertura de nubes.
2. La resolución espacial que definirá el tamaño mínimo de los incendios a ser identificados. Imágenes de resolución espacial media-alta permitirán identificar con mayor precisión incendios de menor tamaño. Sin embargo, este tipo de imágenes suelen presentar frecuencia temporal baja.
3. La resolución espectral, que aportará información más o menos relevante de cara a realizar una correcta caracterización e identificación del área quemadas respecto de otro tipo de cubiertas presente en el territorio afectado (García & Chuvieco, 2004 en Valenzuela et al., 2008)

En función de la información obtenida por las diferentes entidades en cuanto a incendios forestales, y el análisis de las imágenes satelitales existentes para la zona de estudio, se pudo constatar la necesidad de contar con imágenes de alta resolución temporal, debido a la frecuente cobertura de nubes existentes en la región que impedía el uso de imágenes de alta resolución espacial como LANDSAT 8. Por este motivo se optó por utilizar imágenes de menor resolución espacial pero mayor frecuencia temporal como las obtenidas por el sensor MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>) a bordo de las plataformas TERRA y AQUA. La resolución espacial máxima de este tipo de imágenes es de 250 m, siendo la más frecuente de 500 m lo que impide discriminar incendios de pequeño tamaño, por este motivo la investigación se centró en analizar incendios mayores a 100 ha. Aunque el número de incendios mayores de 100 ha. ocurridos en el cantón Cuenca en 2012 según las estadísticas oficiales es pequeño (Tabla I), consideramos que es suficiente para abordar el estudio metodológico que se propone en este trabajo.

Existe una gran variedad de técnicas que permiten cartografiar áreas quemadas a partir de teledetección. La selección de la técnica más apropiada, dependerá de la información disponible y de las características de la zona de estudio (tipos de cubiertas vegetales, tamaño y severidad de los incendios, etc.). Algunos trabajos han demostrado la eficacia del análisis visual para la identificación de áreas quemadas utilizando para ello diversas composiciones en color. Esta técnica se utiliza fundamentalmente sobre imágenes de resolución espacial media alta, tipo Landsat. En este caso, como ya hemos explicado, la ubicación geográfica del área de estudio determina una alta frecuencia de cobertura nubosa por lo que no fue posible utilizar este tipo de imágenes y, por tanto, se descartó el uso de análisis visual.

Entre las técnicas de análisis digital, los índices espectrales son los que más comúnmente se han utilizado para identificar o cartografiar incendios forestales, basándose en su contribución al realce de la señal espectral correspondiente al área quemada (carbón, cenizas o vegetación afectada) con respecto a otros tipos de cubierta natural o artificial (Chuvieco et al., 2006). Muchos de estos índices combinan información de las regiones espectrales del rojo (600 a 700 nm), e infrarrojo cercano (700 a 1300 nm), especialmente indicadas para analizar el estado de la vegetación. Se ha demostrado que las áreas quemadas presentan una mayor reflectividad con respecto a la vegetación no afectada en la región del visible, especialmente si existen depósitos de cenizas procedentes de la combustión. Sin embargo, la reflectividad de las áreas quemadas es menor que la de la vegetación en el infrarrojo cercano (NIR) debido al efecto absorbente del carbón. Al combinar varias bandas los índices espectrales tienden a minimizar efectos atmosféricos o relacionados con la influencia del suelo lo que también resulta de interés en la discriminación de áreas quemadas (Chuvieco, 2002 en Pavón & Rodríguez-Verdú, 2006)

La región espectral del infrarrojo medio de onda corta (SWIR) (1300 a 2500 nm) ha demostrado también gran interés para la cartografía de áreas quemadas. Diversos estudios han comprobado que en esta región espectral se produce un aumento de los valores de reflectividad tras un incendio, como consecuencia de la pérdida de agua en la materia vegetal. Teniendo en cuenta que los efectos atmosféricos son mucho menores que en otros rangos del espectro visible, resulta obvio el potencial del SWIR en la cartografía de incendios, sobre todo tras la proliferación de sensores que obtienen información en esta región del espectro (LANDSAT TM, ETM y OLI, NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation, TERRA-MODIS...) (Martín et al., 2002).

Las bandas del SWIR han sido implementadas en una nueva generación de índices espectrales para cartografiar áreas quemadas mejorando los resultados respecto al uso de índices basados en las regiones del rojo e infrarrojo cercano (Martín et al., 2002; Pereira, Sa et al., 1999; Rogan & Franklin, 2001 en Pavón & Rodríguez-Verdú 2006)

En este trabajo se ha realizado un análisis del comportamiento espectral de las zonas quemadas en la región del Azuay a partir de la información contenida en imágenes adquiridas por el sensor MODIS (bandas del visible, NIR y SWIR). Para ello se han utilizado datos procedentes de dos productos MODIS con distintos niveles de corrección radiométrica en los valores de reflectividad. Concretamente se utilizaron productos con y sin corrección del efecto de las condiciones de iluminación y observación (factor de reflectividad bidireccional (BRDF)) lo que nos permitió valorar la idoneidad de este tipo de correcciones para la cartografía de áreas quemadas. Adicionalmente, a partir de estas imágenes, se han calculado una serie de índices espectrales propuestos en la literatura para la cartografía de áreas quemadas. Finalmente se ha abordado un análisis de separabilidad espectral entre los valores de los índices y bandas registrados en píxeles correspondientes a áreas quemada identificadas en las imágenes respecto a los de otras cubiertas. El estudio se ha realizado para imágenes obtenidas inmediatamente después de la ocurrencia de incendios y también para imágenes adquiridas varios meses después del evento con el propósito de analizar la persistencia temporal de la señal espectral correspondiente al área quemada en la zona de estudio y poder determinar así, la fecha más idónea para la selección de imágenes satelitales de cara a un proceso operativo de cartografía sistemática de los incendios en la zona.

Con esta información ha sido posible, por tanto, identificar las bandas e índices potencialmente más eficaces para discriminar áreas quemadas en función de las características del área de estudio y de la información espectral disponible, analizando además el efecto temporal sobre la degradación de la señal procedente del área quemada.

II. MÉTODO

A. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

El área de estudio incluye una ventana de 221.760,63 km² definida por las coordenadas Noroeste: 625490, 9725253 y Sureste: 794717, 9596666; como se muestra en la Figura 1. Esta ventana está centrada en el cantón Cuenca, perteneciente a la provincia del Azuay, la misma que se encuentra ubicada al sur del Ecuador. El cantón Cuenca por su ubicación geográfica, topografía y tipo de cobertura vegetal presenta vulnerabilidad a la presencia de incendios forestales provocados en su mayoría por el ser humano con la finalidad de ampliar la frontera agropecuaria.

El cantón Cuenca presenta una cobertura vegetal de páramo que ocupa el 28% del territorio, siendo éste un ecosistema sensible a los incendios forestales. Otro tipo de cobertura vulnerable al fuego son los bosques de *Polylepis* y vegetación leñosa nativa que juntos cubren un 24% del territorio cantonal. Por tanto, el 52% del cantón es vulnerable a este tipo de siniestros (Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca, 2011).

Como ya se indicó (Tabla I) durante los meses de agosto a octubre del año 2012 en el cantón Cuenca se vio afectado por una serie de incendios forestales, algunos de tamaño considerable que serán objeto de estudio de este trabajo.

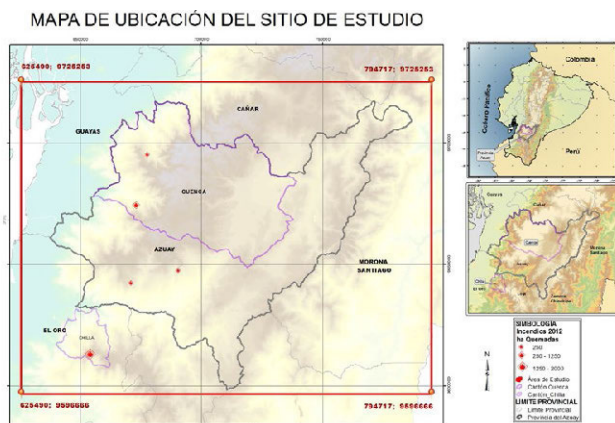


Figura 1. Ubicación del área de estudio

B. DATOS

En el presente estudio se han utilizado imágenes satelitales obtenidas por el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), que se encuentra a bordo de las plataformas TERRA y AQUA. Este sensor adquiere datos de carácter global con una frecuencia diaria. Posee 36 bandas espectrales que ofrecen información en longitudes de onda que van desde 405 a 14385 nm (Visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio de onda corta e infrarrojo térmico) (Tabla II). Dos de estas bandas (banda 1 y 2 correspondientes a las regiones del rojo e infrarrojo cercano) cuentan con una resolución espacial de 250m, cinco bandas tienen resolución de 500m y las 29 bandas restantes de 1 Km. Este sensor permite detectar focos de calor, como los incendios forestales mediante la información captada en la región del infrarrojo térmico (TIR).

TABLA II. CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR MODIS.

BANDA	RANGO ESPECTRAL (NM)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (M)
1	620-670	250
2	841-876	250
3	459-479	500
4	545-565	500
5	1230-1250	500
6	1628-1652	500
7	2105-2155	500
8	405-420	1000
9	438-493	1000
10	483-493	1000
11	526-536	1000
12	546-556	1000
13	662-672	1000
14	673-383	1000
15	743-753	1000
16	862-877	1000
17	890-920	1000
18	931-941	1000
19	915-965	1000
20	3660-3840	1000
21	3929-3989	1000
22	3929-3989	1000
23	4020-4080	1000
24	4433-4498	1000
25	4482-4529	1000
26	1360-1390	1000
27	6535-6895	1000
28	7175-7475	1000
29	8400-8700	1000
30	9580-9880	1000
31	10780-11280	1000
32	11770-12270	1000
33	13185-13485	1000
34	13485-13785	1000
35	13785-14085	1000
36	14085-14385	1000

Además de las imágenes originales, el organismo que se encarga de la adquisición y distribución de los datos a nivel global (Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS, USA) genera una gran cantidad de productos derivados del sensor MODIS que han sido diseñados para analizar distintas características de la cubierta terrestre, los océanos y la atmósfera. En este trabajo se han utilizado concretamente los productos MD09A1 y MCD43A4. Sus principales características se describen en la Tabla III. Todos los productos se han descargado de forma gratuita desde la plataforma de acceso a las imágenes del USGS (www.glovis.usgs.gov).

El producto MOD09A1, ofrece información de la reflectividad captada por el sensor en 7 bandas que recogen datos espectrales en las regiones del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio de onda corta (459 a 2155 nm). Se trata de un producto compuesto temporalmente con información adquirida durante un período de ocho días. La imagen resultante toma para cada píxel, las mejores observaciones (menor contaminación por nubes, mejor calidad radiométrica y geométrica, etc.) durante este período, lo que permite disminuir la cantidad de nubes y otros posibles problemas de adquisición en la imagen (García-Mora & Mas, 2011)

El producto MCD43A4, es un compuesto de 16 días que combina información procedente de las plataformas TERRA y AQUA. Tiene las mismas bandas que el producto MOD09A1

pero cuenta con una corrección de la reflectividad en función de las condiciones de observación e iluminación teniendo en cuenta el factor de reflectancia bidireccional que considera la anisotropía (la energía reflejada no es la misma en todas las direcciones, dependiendo del ángulo de observación y de iluminación solar) de las diferentes coberturas del suelo y aplica una corrección para atenuar este efecto. Este tipo de corrección simula una observación nadir para todos los píxeles de la imagen lo cual permite, en principio, una comparación más adecuada entre píxeles de la misma imagen y también entre imágenes adquiridas en distintas fechas. Al ser un producto combinado de dos satélites permite disminuir errores por nubes, sombras, etc. En el estudio se ha utilizado este producto para realizar una comparación con el producto MOD09A1 (García-Mora & Mas, 2011).

En este trabajo los productos MOD09A1 y MCD43A4 se utilizaron para analizar el comportamiento espectral de las áreas quemadas en la zona de interés mediante el análisis de las bandas originales de la imagen y los índices espectrales que se calcularon a partir de ellas.

TABLA III.
CARACTERÍSTICAS DE PRODUCTOS MODIS UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO

PRODUCTOS	MOD09A1	MCD43A4
Plataforma	TERRA	Combinado TERRA/AQUA
Resolución Temporal	8 Días	16 Días
Información Espectral	Reflectividad bandas 1 -7	Reflectividad bandas 1-7 Corregida del BRDF
Resolución Espacial	500 m	500 m

Para seleccionar las imágenes que se utilizaron en el presente trabajo se consideró la cercanía a las fechas de los incendios registrada por la Secretaría Nacional de Riesgos (Tabla I). De igual manera se escogieron imágenes post-incendios (más y menos recientes), evitando las que tenían una alta cobertura de nubes. Las imágenes pre-seleccionadas y finalmente utilizadas en este estudio aparecen relacionadas en la Tabla IV y Figura 2.

TABLA IV.
PRODUCTOS E IMÁGENES MODIS UTILIZADAS EN EL TRABAJO

PRODUCTO MODIS	IMAGEN	DÍA JULIANO	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	INCENDIOS REGISTRADOS POR SNR	ÁREA (HA)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (M)
MCD43A4	MCD43A4.A2012249.h10v09.005.2012270132613	249	05-sep-12	21-sep-12	03-sep-12	1250	500
	MCD43A4.A2012329.h10v09.005.2012346153255	329	24-nov-12	09-dic-12	03-sep-12	1250	
				06-sep-12	2000		
				06-sep-12	2000		
MOD09A1	MOD09A1.A2012249.h10v09.005.2012258065321	249	05-sep-12	13-sep-12	03-sep-12	1250	500
	MOD09A1.A2012329.h10v09.005.2012340002622	329	24-nov-12	01-dic-12	03-sep-12	1250	
				06-sep-12	2000		
				06-sep-12	2000		

C. PRE - PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

Los productos MODIS son distribuidos por el USGS en mosaicos (tiles) de 10x10 ° en proyección sinusoidal, con una resolución radiométrica de 16 bits. Los valores de reflectividad de las bandas originales están escalados entre 0 y 10.000. Gracias a la herramienta MCTK conversion Toolkit, una extensión del software ENVI que está disponible libremente en: <https://github.com/dawwhite/MCTK>, hemos re proyectado las imágenes al sis-

tema UTM, WGS84 zona 17 sur y re-escalado los valores a 8 bits (valores de reflectividad de 0 a 1) para poder calcular los índices espectrales. Además, se recortaron las imágenes al área de estudio con el fin de trabajar con la ventana definida en la Figura 1 correspondiente a la provincia del Azuay y sus zonas aledañas.

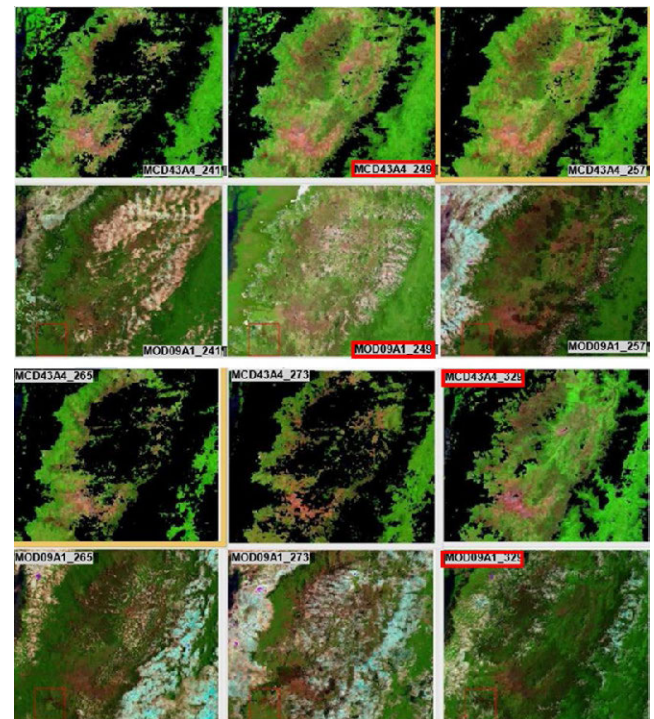


Figura 2. Serie temporal de productos de reflectividad (MOD09A1 y MCD43A4) pre-seleccionadas en este estudio.

Las fechas finalmente utilizadas aparecen remarcadas en rojo. Composición en color RGB de las bandas 721 (Figura 2). En el producto MCD43A4 los píxeles con calidad insuficiente para aplicar la corrección del BRDF (nubes) aparecen con valor 0 (negro). En el producto MOD09A1 los píxeles con todos blancos-azulados corresponden a cobertura de nubes.

D. CÁLCULO DE ÍNDICES ESPECTRALES.

En este trabajo se han calculado seis índices espectrales que se han seleccionado entre los habitualmente utilizados en la literatura para la cartografía de áreas quemadas a partir de imágenes de satélite. El objetivo fue comprobar cuál de ellos permite una mejor discriminación entre áreas quemadas y otras cubiertas en la zona de estudio en función de sus características específicas (tipo y tamaño de incendios, características de las cubiertas vegetales, etc.). Todos los índices se han calculado a partir de los productos MOD09A1 Y MCD43A4 con el propósito de comparar los resultados entre índices calculados con valores de reflectividad corregidos y no corregidos del efecto de reflectividad bidireccional. Los índices calculados son:

1) **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**

Se calcula como la diferencia normalizada de las bandas del rojo y del infrarrojo cercano ecuación [1]:

$$NDVI = \frac{IRC-C}{IRC+C} \tag{1}$$

Su rango varía de -1 a 1 con valores próximos a 1 para zonas con vegetaciones vigorosas y próximas a 0 para zonas desprovistas de vegetación, como es el caso de las zonas quemadas.

A pesar que este índice se ha utilizado para análisis multitemporales con la finalidad de cartografiar áreas quemadas, se ha demostrado que no es el más idóneo para este fin en relación a otros índices desarrollados para este propósito debido, entre otros factores, a que está muy afectado por la influencia del suelo (Chuvieco et al., 2002; Pereira, 1999; Stroppiana al., 2002; Trigg & Flasse, 2001 en Saldivia & Salinero 2007), sin embargo con motivos de corroborar esta información fue aplicado en este trabajo.

$$IAQ_i = 1 / ((\rho_{c_r} - \rho_{i_r})^2 + (\rho_{c_m} - \rho_{i_m})^2) \quad (2)$$

El índice combina información de las regiones del rojo e infrarrojo cercano sienta los puntos de convergencia de 0,1 y 0,6 respectivamente. Estos puntos representan la reflectividad esperada en una zona recientemente quemada con un grado de severidad alto (combustión completa o casi completa de la vegetación y presencia de carbón y cenizas) lo que ayuda a enfatizar la separabilidad espectral de las zonas quemadas respecto a otras cubiertas vegetales y no vegetales (suelos, agua, etc.) (Martín & Chuvieco, 1998 en Heredia Laclaustra et al., 2003).

3) BAIM (Burned Area Index MODIS)

Es una variación del IAQ, donde la banda del rojo se sustituye por la del infrarrojo medio de onda corta (SWIR) menos influenciada por los efectos atmosféricos (Martín et al., 2005 en Chuvieco et al. 2006). En este trabajo se calcularon dos versiones del BAIM que proponen distintos valores de convergencia para la banda del SWIR BAIM1 $P_{cswir} = 0,2$; $P_{cswir} = 0,04$ y BAIM2 $P_{cswir} = 0,2$; $P_{cswir} = 0,08$. El sensor MODIS, presenta tres bandas del SWIR, las bandas 5, 6 y 7. Para este estudio se utilizó la banda 7, debido al bandeado existente en la banda 5 para los productos con datos de la plataforma TERRA y la banda 6 presenta bandeado para los productos provenientes de la plataforma AQUA, como lo muestra la ecuación [3]

$$BAI = \frac{1}{(P_{cswir} - \rho_{swir})^2 + (P_{cnir} - \rho_{nir})^2} \quad (3)$$

4) GEMI (Global Environmental Monitoring Index)

$$GEMI = \eta(1 - 0.25\eta) - \left[\frac{\rho_{RED} - 0.125}{1 - \rho_{RED}} \right] \quad (4)$$

Fue definido como una alternativa al NDVI, se encuentra menos afectado por el suelo y las condiciones atmosféricas. Trabajos anteriores han demostrado que resulta más apropiado para la cartografía de áreas quemadas que el NDVI (Martín & Chuvieco 1998 en Pavón & Rodríguez-Verdú, 2006) (Ecuación [4])

Dónde (Ecuación [5]):

$$\eta = \frac{2 \cdot (\rho_{NIR}^2 - \rho_{RED}^2) + 1.5\rho_{NIR} + 0.5\rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0.5} \quad (5)$$

5) NBR (Normalized Burn Ratio)

Presenta la misma formulación del NDVI pero utiliza las banda del infrarrojo próximo (0,76-0,9 μm) (banda2) e infrarrojo medio de onda corta (2,08-2,35 μm) (banda 7). Fue diseñado originalmente para ser utilizado a partir de imágenes Landsat (Key & Benson, 2005) (Ecuación [6]):

$$NBR = \frac{\rho_{IRC} - \rho_{SWIR}}{\rho_{IRC} + \rho_{SWIR}} \quad (6)$$

Diversos trabajos han demostrado que la incorporación de la banda del SWIR mejora considerablemente la distinción entre áreas quemadas y no quemadas con respecto al NDVI.

E. CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE LAS ÁREAS QUEMADAS

Con el propósito de analizar el comportamiento espectral de las áreas quemadas y las principales cubiertas presentes en la zona de estudio se identificaron píxeles representativos de cada una de estas cubiertas en las imágenes/productos analizados y se extrajeron, para esos píxeles, los valores de cada banda original (bandas 1 a 7) y de cada uno de los índices calculados.

Los píxeles representativos de cada cubierta o regiones de interés (ROIs), como se los denomina en el programa ENVI utilizado en el análisis, fueron localizados visualmente sobre composiciones en color de las imágenes. En el caso de los píxeles correspondientes a áreas quemadas, éstos se identificaron sobre dos grandes incendios ocurridos en la zona de Chaucha (Cuenca - Azuay) y Chilla (Chilla - El Oro). Para la ubicación de las áreas representativas de las cubiertas de ocupación de suelo se utilizó como apoyo la cartografía de uso de suelo generada por el Municipio de Cuenca para el Plan de Ordenamiento Territorial del cantón, año 2010. Además de las áreas quemadas se analizaron un total de 5 cubiertas de usos, 3 correspondientes a vegetación natural (páramo, bosque y pastizal), 1 cubierta que representa las zonas de cultivo y otra a las zonas urbanas. Se incorporó además una categoría de cubierta nubosa por ser ésta muy frecuente en la zona de estudio. Se intentó que los ROI de cada cubierta incluyeran zonas suficientemente homogéneas y representativas lo que, en algunos casos, condicionó el número de píxeles identificados en cada categoría. La Figura 3 y Tabla V muestran las cubiertas analizadas y la localización de los ROIs identificados para cada una de ellas.

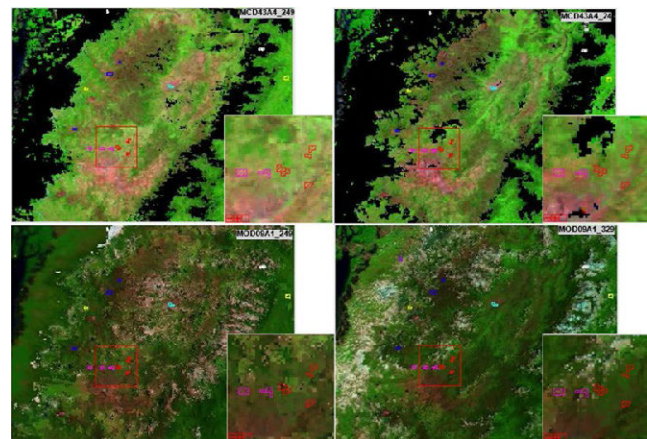


Figura.3 Localización de los ROIs identificados para cada cubierta.

Incluyen los píxeles cuyos valores serán utilizados en el análisis de caracterización y separabilidad espectral. En las ventanas de zoom se observan los ROIs de las cubiertas de cultivos y pastizal

Cabe mencionar que la localización de algunos ROIs tuvo que adaptarse a cada imagen para evitar incluir píxeles contaminados por nubes o sombras de nubes dado que su posición varía en las distintas fechas analizadas.

TABLA V.

TIPOS DE CUBIERTA IDENTIFICADOS PARA EL ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN/SEPARABILIDAD ESPECTRAL Y NÚMERO DE PÍXELES TOMADOS POR MUESTRA

CUBIERTAS	Nº DE PÍXELES	COLOR EN LA FIGURA 3
Nubes	17	Blanco
Área quemada	14	Café
Páramo	37	Azul
Bosque	36	Amarillo
Cultivos	36	Magenta
Área urbana	14	Cardenillo
Pastizal	37	Rojo

Una vez realizadas la extracción de los píxeles correspondientes a cada cubierta para los productos MODIS analizados en este trabajo se calcularon los valores de media y desviación estándar para cada cubierta y banda/índice, se construyeron gráficos de separabilidad que muestran el valor de media \pm 1 desviación típica para cada banda/índice y tipo de cubierta. Este tipo de gráficos permite analizar, de forma cualitativa, el solapamiento espectral entre categorías en las distintas bandas e índices analizados considerando, no sólo el valor promedio, sino también la dispersión de los valores espectrales que caracterizan a cada cubierta, es decir, su variabilidad interna.

F. ANÁLISIS DE SEPARABILIDAD ESPECTRAL.

Aunque los gráficos de separabilidad espectral antes mencionados permiten una primera valoración cualitativa de la capacidad de bandas e índices para discriminar entre áreas quemadas y otras cubiertas de la imagen, en este trabajo se realizó, además, un análisis cuantitativo para poder establecer de forma más precisa qué banda o índice espectral discrimina de mejor forma el área quemada del resto de cubiertas analizadas. Para ello calculamos un índice M de separabilidad propuesto por Pereira (Ecuación [7]) (1999 en Pavón & Rodríguez-Verdú, 2006).

Donde:

$$M = \frac{(\mu_c - \mu_q)}{(\sigma_c + \sigma_q)}$$

- μ_c = Es la media de cada una de las cobertura vegetales no quemadas.
- μ_q = Es la media de las áreas quemadas.
- σ_c = Desviación estándar de los valores de las coberturas vegetales no quemadas
- σ_q = Desviación estándar de las áreas quemadas

Valores de M superiores a 1, indican una buena separabilidad, mientras que los valores menores a 1 demuestran un solape espectral de los histogramas de las diferentes coberturas con respecto al área quemada, es decir, no existe una buena discriminación de las mismas. Los valores de separabilidad nos indicarán qué bandas o índices son más adecuados para la cartografía de incendios forestales con imágenes MODIS en Ecuador.

III. RESULTADOS

A. CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE LAS ÁREAS QUEMADAS

Las Figuras 4 y 5 muestran los gráficos de caracterización espectral elaborados a partir de la información correspondiente a las bandas originales de los productos MODIS analizados.

En estas figuras las líneas horizontales representan los valores medios de reflectividad de los píxeles identificados para cada categoría; y las barras verticales la dispersión respecto a ese valor medio (\pm 1 desviación típica). Líneas horizontales muy próximas o solapadas indicarán un comportamiento espectral muy similar de las cubiertas en las correspondientes

bandas/índices espectrales. Por el contrario, líneas muy separadas indicarán una buena separabilidad espectral entre las cubiertas. Las barras verticales por su parte, permiten analizar posibles confusiones considerando la variabilidad espectral interna de cada cubierta. Es posible que algunas cubiertas presenten valores de media distintos (por tanto espectralmente separables) pero que esta separabilidad no sea posible si consideramos su variabilidad interna (desviación típica). En principio cuanto mayor sea ésta variabilidad, mayor será el riesgo de confusión con otras cubiertas.

Para una correcta visualización de los datos en los gráficos generados los valores originales de los índices espectrales NDVI, NBR y GEMI han sido re-escalados (x 100) para que alcancen un rango similar a los índices IAQ, BAIM1 y BAIM2.

En la Figura 4 se observa que las cubiertas vegetales (bosque, pastizal, cultivos y páramo) presentan un comportamiento espectral típico, con valores de reflectividad bajos en las bandas 3, 4 y 1 (visible) debido al efecto absorbente de los pigmentos foliares; altos en la banda 2 (infrarrojo cercano) debido a la reflexión de la radiación solar que producen en esta región las cavidades de aire internas de las hojas sanas y vigorosas; y medios en las bandas 5, 6 y 7 (infrarrojo medio de onda corta), relacionados con el contenido de agua de las plantas. El área quemada presenta los valores más bajos en todas las bandas debido en parte al efecto absorbente de los residuos de la combustión (carbón y cenizas). Se observan solapes evidentes entre áreas quemadas y cubiertas vegetales en las bandas del visible y también, aunque en menor medida, en la banda 7. Sin embargo la separabilidad es mayor en las bandas 2, 5 y 6 (NIR y SWIR). Se observa claramente cómo la confusión con otras cubiertas, especialmente con el páramo, aumenta en la imagen de noviembre (DOY 329), adquirida varios meses después de los incendios analizados, debido a la transformaciones que se producen en las áreas quemadas con el paso del tiempo y que incluyen habitualmente la desaparición de los materiales de combustión (carbón y cenizas) por efecto del viento y la lluvia; y la regeneración de la vegetación. Estas transformaciones hacen que la respuesta espectral de las áreas quemadas sea menos nítida y se asemeje más a otras cubiertas presentes en la imagen. Esto confirma la conveniencia de utilizar imágenes post-incendio adquiridas en fechas próximas a la ocurrencia de los incendios para realizar una adecuada discriminación y delimitación de las zonas afectadas. Esto sólo es posible en la zona de estudio si se utilizan imágenes procedentes de sensores de alta o muy alta resolución temporal tipo MODIS. En la misma Figura 4 vemos que tanto la categoría área urbana como la categoría nubes presentan un comportamiento espectral bastante diferenciado respecto a las áreas quemadas. Las nubes presentan valores de reflectividad muy altos y, aunque su variabilidad interna también es muy elevada, no existe riesgo de confusión con las áreas quemadas. Sin embargo, las sombras de nubes, no analizadas en este estudio, si han sido identificadas por diversos autores como áreas problemáticas de cara a la cartografía de incendios, pues presentan un comportamiento espectral muy similar a las zonas recientemente quemadas, especialmente en la región del visible. Esto mismo ocurre con las zonas de agua que presentan típicamente valores muy bajos de reflectividad en todo el espectro óptico por lo que el riesgo de confusión con zonas recientemente quemadas también es importante. En el caso de las láminas de agua el problema de la confusión espectral no es tan grave ya que, al ser zonas con una ubicación estable, pueden utilizarse máscaras, basadas por ejemplo en información obtenida de mapas de usos, para eliminarlas previamente del análisis y evitar así confusiones espectrales.

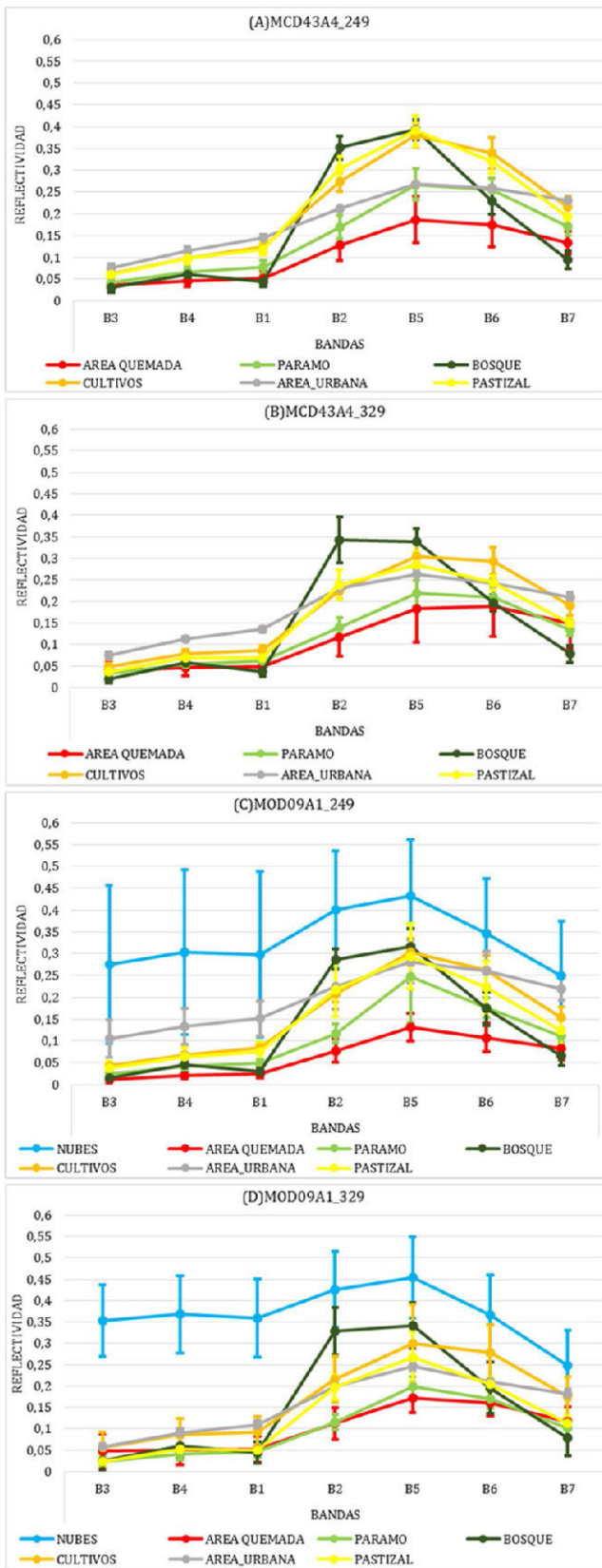


Figura.4 Caracterización espectral de las cubiertas analizadas para las 7 bandas originales.

- A) producto MCD43A4 de septiembre 2012 (día 249),
- B) producto MCD43A4 de noviembre 2012 (día 329),
- C) producto MOD09A1 de septiembre 2012 (día 249),
- D) producto MOD09A1 de noviembre 2012 (día 329)

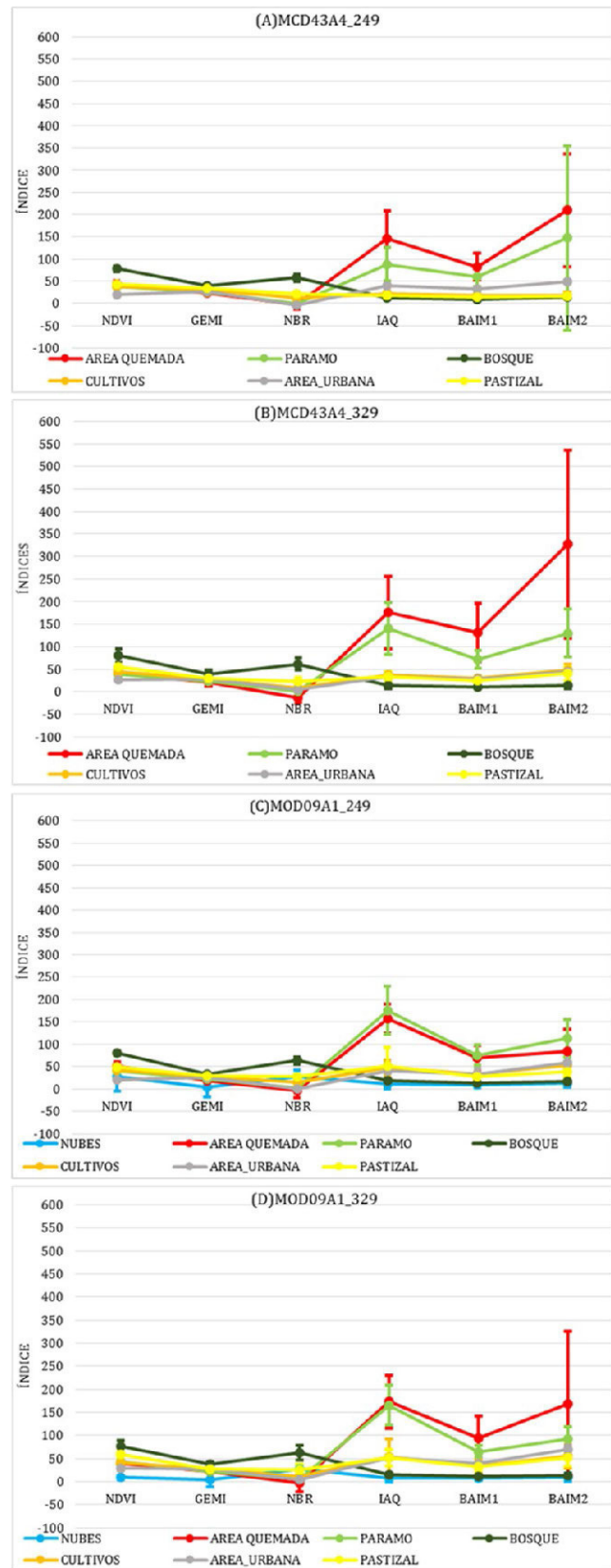


Figura.5 Caracterización espectral de las cubiertas analizadas para los 6 índices espectrales.

- A) producto MCD43A4 de septiembre 2012 (día 249),
- B) producto MCD43A4 de noviembre 2012 (día 329),
- C) producto MOD09A1 de septiembre 2012 (día 249),
- D) producto MOD09A1 de noviembre 2012 (día 329)

A simple vista, el comportamiento espectral de las distintas cubiertas es muy similar en los productos con y sin corrección del BRDF (MCD43A4 y MOD09A1 respectivamente). Sin embargo, parece observarse una mayor variabilidad interna de las cubiertas en el caso del producto MCD43A4, que podría dificultar la separabilidad espectral del área quemada respecto a otras cubiertas. Esto lo podremos confirmar a partir de análisis cuantitativo realizado con el índice de separabilidad que se comenta en la siguiente sección.

Como podemos observar en la Figura 5 el comportamiento de los índices estudiados, para las diferentes cubiertas vegetales, permiten identificar en una primera aproximación cualitativa, cuál de los seis índices presenta una mejor discriminación entre áreas quemadas y otras cubiertas. Para el producto MODIS MCD43A4 (Figura 5 A y B), el índice NDVI, permite una buena discriminación de las coberturas vegetales más vigorosas, en este caso el bosque, el cual no presenta solapamientos con respecto a otras coberturas, de igual manera sucede con el área urbana, debido a sus características espectrales, sin embargo las coberturas de páramo y cultivos no son bien discriminadas con este índice. Pudimos observar que los valores generados por este índice presentan solapamiento entre las coberturas cultivos, páramo, pastizales y el área quemada, lo cual concluye que este índice no discrimina el área quemada objeto de este estudio lo que corrobora lo ya mencionado en varios estudios (Pereira 1999). Lo mismo ocurre con el índice GEMI, con valores menores pero similares existiendo solapamiento, en especial con las cubiertas de cultivos, pastizales y área urbana. El bosque presenta puntos de confusión con las cubiertas mencionadas y, presenta de igual manera valores similares entre el área quemada y el páramo.

El índice NBR, presenta mejores resultados que los mencionados anteriormente, sin embargo la similitud en el comportamiento del páramo y el área quemada sigue presentándose como un problema para el estudio. Este índice sustituye la banda del rojo (banda 1) por la del infrarrojo medio de onda corta (banda 7) que, como vimos en la figura 4, presenta mejor separabilidad entre zonas quemadas y otras cubiertas. Sin embargo, la mayor separabilidad entre el páramo y el área quemada en la región del SWIR se observa en la banda 5 por lo que podría analizarse en futuros estudios la posibilidad de utilizar ésta en lugar de la banda 7, en la formulación del NBR.

Con respecto al producto MOD9A1, el comportamiento de los índices es similar al del producto con corrección del BRDF, no existe una variación notable, salvo que presenta una variabilidad interna menor, lo cual permitiría, en principio, una mejor separabilidad entre las cubiertas, esto considerando imágenes cercanas a la fecha de incendios.

Los índices IAQ, BAIM1 y BAIM2 presentan una buena separabilidad entre área quemada y otras cubiertas a excepción del páramo, que presenta valores similares a los de los incendios, especialmente en la imagen de septiembre. Una de las peculiaridades de estos índices es su alta variabilidad interna (elevada desviación típica) que influye negativamente en su capacidad de discriminación. Estos índices han sido creados para potencializar la presencia de carbón y cenizas en las bandas del infrarrojo medio de onda corta. Sin embargo, como se pudo observar en la Figura 4, de las tres bandas SWIR de MODIS (5, 6 y 7), esta última presenta la peor discriminación con respecto a las otras dos bandas. Aunque los autores que propusieron estos índices utilizaron la banda 7 con el propósito de, mejorar la discriminación con respecto a sombras y agua, consideramos que, en este caso, sería posible contemplar la utilización de la banda 5 (para productos MODIS que

provengan del sensor AQUA) o la banda 6 (para productos del sensor TERRA), esto debido al bandeado ya explicado, para mejorar los resultados de estos índices.

La Figura 5B nos muestra que el producto MCD43A4, parece ofrecer una discriminación mayor de las diferentes cubiertas, en comparación con el producto MOD09A1 (Figura 5D) lo que indicaría que a este es más adecuado para la cartografía de incendios en la zona cuando no se cuenta con imágenes recientes respecto a la fecha del incendio.

Como veíamos en el caso de las bandas originales, también los índices permiten discriminar sin problema la cubierta nubosa respecto al área quemada debido a que ambas presentan un comportamiento espectral muy diferenciado.

B. ANÁLISIS DE SEPARABILIDAD ESPECTRAL

En las Tablas. 6 y 7 se muestran los valores de separabilidad M obtenidos para cada cobertura y cada banda/índice en los dos productos y fechas analizados. En general, podemos decir que los valores de M mayores de 1 indican una buena separabilidad espectral, mientras que los valores menores de 1 representan una importante superposición de los histogramas de las dos clases que se comparan (en este caso áreas quemadas frente a otras cubiertas). En las tablas hemos resaltado en color verde la mayor separabilidad para cada cubierta y en el color rojo los valores más bajos de separabilidad.

Los valores de índice M obtenidos confirman los resultados cualitativos previamente comentados en los gráficos de separabilidad. En general, existe una buena separabilidad espectral entre las zonas quemadas y el resto de cubiertas de la imagen excepto para la cubierta páramo, que presenta los valores más bajos de M, en algunos casos inferiores a 1, especialmente en el producto MCD43A4. La separabilidad de esta cubierta se reduce considerablemente en la imagen de noviembre (DOY 329), donde el páramo presenta siempre valores de M inferiores a 1, es decir, no es espectralmente diferenciable de las áreas quemadas. Esto refuerza la necesidad de contar con imágenes recientes post-incendio para realizar una adecuada discriminación de las áreas quemadas. Esto es especialmente importante en la zona de estudio, donde las áreas de páramo son unas de las más sensibles a la ocurrencia de incendios.

Las otras dos cubiertas de vegetación natural consideradas en este estudio presentan valores de separabilidad aceptables, especialmente en las bandas 2 y 5 (NIR y SWIR) siendo, en general, más altos los valores de separabilidad para el bosque que para el pastizal. Los valores de separabilidad también disminuyen en la imagen de noviembre pero siguen manteniéndose por encima de 1 en la banda del NIR y en la mayor parte de los índices espectrales.

Los cultivos presentan valores de separabilidad similares a los del pastizal, mientras que las áreas urbanas ofrecen también valores de separabilidad altos, especialmente en la región del visible.

En la imagen MCD43A4 para la fecha de septiembre (DOY 249) la banda 2 (NIR) presenta la mejor separabilidad con respecto al área quemada para la mayor parte de las cubiertas analizadas, salvo en el caso del páramo y el área urbana. Para la imagen del mes de noviembre del producto MCD43A4, sin embargo, en general el índice NBR, presenta el valor más alto de separabilidad. Esto indica que los índices espectrales ayudan a realzar la respuesta espectral de las áreas quemadas cuando ésta resulta ya más débil debido al tiempo transcurrido desde el inicio del incendio hasta la adquisición de la imagen.

Esto debe tenerse en cuenta de cara a un posible uso operativo de las imágenes MODIS para la cartografía de incendios en el Ecuador

El análisis del producto MOD09A1, muestra que, en general, los índices espectrales presentan mejor separabilidad que las bandas originales, especialmente en el caso del IAQ. Estos resultados no coinciden con los de otros autores, donde los índices basados en el NIR-SWIR mejoran los resultados respecto a los que utilizan ROJO-NIR, como el IAQ. Esto puede deberse a que, en la zona de estudio, la banda 7, utilizada en el cálculo de los índices NIR-SWIR (NBR, BAIM1 y BAIM2) presentan valores de separabilidad relativamente bajos comparados con otras bandas del SWIR como la banda 5 o la 6. Esto sugiere la posibilidad de proponer, en trabajos futuros, una modificación de estos índices basada en el uso de estas bandas en lugar de la banda 7. No obstante debe tenerse en cuenta, como ya hemos comentado, que la banda 5 presenta un problema de bandeo en el sensor MODIS-TERRA y la banda 6 en el sensor MODIS-AQUA por lo que habrá de utilizarse una u otra en función del origen de los datos utilizados. También es interesante constatar que el BAIM1 ofrece siempre mejores valores de separabilidad que el BAIM2 por lo que podemos deducir que el punto de convergencia del NIR= 0,04 se adapta mejor a las características de la zona de estudio. Esto sugiere también la posibilidad de adaptar los puntos de convergencia de este índice para realizar la cartografía de áreas quemadas en Ecua-

dor. Para ello se podría analizar una serie más larga de datos, incluyendo otros incendios que permitan confirmar cuál es el comportamiento espectral tipo de los incendios en el Ecuador

Si comparamos los valores de separabilidad promedio obtenidos para los productos MCD43A4 y MOD09A1 vemos que los resultados son muy similares. Para el producto MOD09A1 se calculó el valor medio para todas las cubiertas, y también sin considerar la cobertura de nubes para hacerlo más comparable a la media obtenida para el producto MCD43A4. De la comparación de estos valores observamos que la separabilidad media es ligeramente superior en el producto MOD09A1 en la imagen de septiembre pero es inferior en la de noviembre. Esto podría indicar que la corrección del BRDF aplicada al producto MCD43A4 realza mejor la separabilidad espectral entre el área quemada y otras cubiertas cuando la señal post-incendio es menos nítida debido al tiempo transcurrido desde la ocurrencia del incendio a la adquisición de la imagen.

La Figura 6 muestra de forma gráfica los valores de separabilidad de las Tabla. 6 y Tabla. 7, en la cual podemos comparar más fácilmente el comportamiento global de cada banda/índice, con respecto a cada cubierta, producto y fecha.

Resulta evidente que los valores de separabilidad disminuyen notablemente conforme nos alejamos de la fecha del incendio, esto debido a la pérdida de contenido de carbón y ceniza en el área quemada.

TABLA VI.
VALORES DE SEPARABILIDAD M CALCULADOS PARA LAS IMÁGENES MCD43A4

COBERTURA VEGETAL		NUBES		PARAMO		BOSQUE		CULTIVOS	
IMAGEN		249	329	249	329	249	329	249	329
BANDAS	B1	1,37	2,51	1,39	0,14	0,27	0,15	2,99	0,58
	B2	2	2,5	0,79	0,06	4,13	2,34	2,8	1,14
	B3	1,41	2,44	1,16	0,46	0,3	0,36	2,94	0,1
	B4	1,44	2,54	1,39	0,22	1,45	0,17	3,19	0,48
	B5	1,87	2,14	0,83	0,42	2,54	1,91	2,75	1,02
	B6	1,51	1,65	1,25	0,15	0,93	0,38	2,29	1,21
	B7	1,09	1,15	0,68	0,33	0,36	0,52	1,39	0,72
ÍNDICE ESPECTRALES	NDVI	0,6	1,91	0,75	0,21	2,19	1,67	0,77	0,13
	GEMI	0,58	0,96	1,12	0,07	3,5	2,05	2,98	1,17
	NBR	1,05	1,02	0,19	0,31	2,8	1,81	0,85	0,51
	IAQ	3,24	2,51	0,21	0,07	3,9	2,6	2,22	1,24
	BAIM1	1,72	1,63	0,13	0,49	1,97	1,67	1,14	0,99
	BAIM2	1,19	0,97	0,33	0,42	1,31	0,98	0,53	0,63
COBERTURA VEGETAL		ÁREA URBANA		PASTIZAL		MEDIA		MEDIA SIN NUBES	
IMAGEN		249	329	249	329	249	329	249	329
BANDAS	B1	2,54	1,37	1,58	0,05	1,69	0,8	1,76	0,46
	B2	1,86	2	1,58	1,3	2,19	1,56	2,23	1,37
	B3	1,93	0,19	1,21	0,5	1,5	0,68	1,52	0,32
	B4	2,27	0,91	1,55	0,05	1,88	0,73	1,97	0,37
	B5	1,84	1,54	1,53	0,99	1,89	1,34	1,9	1,17
	B6	1,98	1,24	1,26	0,9	1,54	0,92	1,54	0,78
	B7	2,6	1,37	0,68	0,07	1,14	0,7	1,14	0,6
ÍNDICE ESPECTRALES	NDVI	2,68	0,62	0,21	1,06	1,2	0,93	1,32	0,74
	GEMI	2,3	1,88	1,61	1,19	2,01	1,22	2,3	1,27
	NBR	0,17	0,28	1,42	0,91	1,08	0,81	1,09	0,76
	IAQ	2,37	1,96	1,43	1,63	2,23	1,67	2,02	1,5
	BAIM1	0,91	1,08	1,16	1,06	1,17	1,15	1,06	1,06
	BAIM2	0,35	0,61	0,73	0,67	0,74	0,71	0,65	0,66

TABLA VII.
VALORES DE SEPARABILIDAD M CALCULADOS PARA LAS IMÁGENES MOD09A1

COBERTURA VEGETAL		PARAMO		BOSQUE		CULTIVOS	
IMAGEN		249	329	249	329	249	329
BANDAS	B1	0,88	0,5	0,25	0,43	2,46	1,31
	B2	0,64	0,32	3,5	2,3	2,49	1,68
	B3	0,37	0,22	0,38	0,66	1,87	0,34
	B4	0,81	0,34	0,72	0,4	2,34	1,29
	B5	0,91	0,34	2,72	1,45	2,44	1,14
	B6	1,07	0,21	0,67	0,08	1,91	1,02
	B7	0,79	0,21	0,85	0,91	1,63	0,51
ÍNDICE ESPECTRALES	NDVI	0,58	0,12	2,59	1,18	0,57	0,13
	GEMI	0,7	0,18	3,28	1,02	2,3	0,7
	NBR	0,13	0,91	3,27	3,31	1,03	1,32
	IAQ	0,6	0,26	2,15	1,89	1,91	1,57
	BAIM1	0,44	0,7	2,31	1,75	1,91	1,44
	BAIM2	0,18	0,76	1,5	1,46	1,42	1,27
COBERTURA VEGETAL		ÁREA URBANA		PASTIZAL		MEDIA	
IMAGEN		249	329	249	329	249	329
BANDAS	B1	3,85	3,58	2,22	0,82	1,93	1,33
	B2	1,98	1,99	2,68	1,52	2,26	1,56
	B3	2,76	1,3	1,45	0,12	1,37	0,53
	B4	3,22	2,83	2,05	1	1,83	1,17
	B5	1,42	0,92	2,34	0,95	1,97	0,96
	B6	1,46	0,65	1,87	0,62	1,4	0,52
	B7	2,96	0,87	1,3	0,01	1,51	0,5
ÍNDICE ESPECTRALES	NDVI	2,52	0,74	0,01	0,54	1,25	0,54
	GEMI	1,15	0,62	2,37	0,72	1,96	0,65
	NBR	0,12	1,49	1,6	1,84	1,23	1,78
	IAQ	1,68	1,68	1,99	1,56	1,67	1,39
	BAIM1	1,56	1,51	2,04	1,45	1,65	1,37
	BAIM2	1,22	1,31	1,46	1,28	1,16	1,22

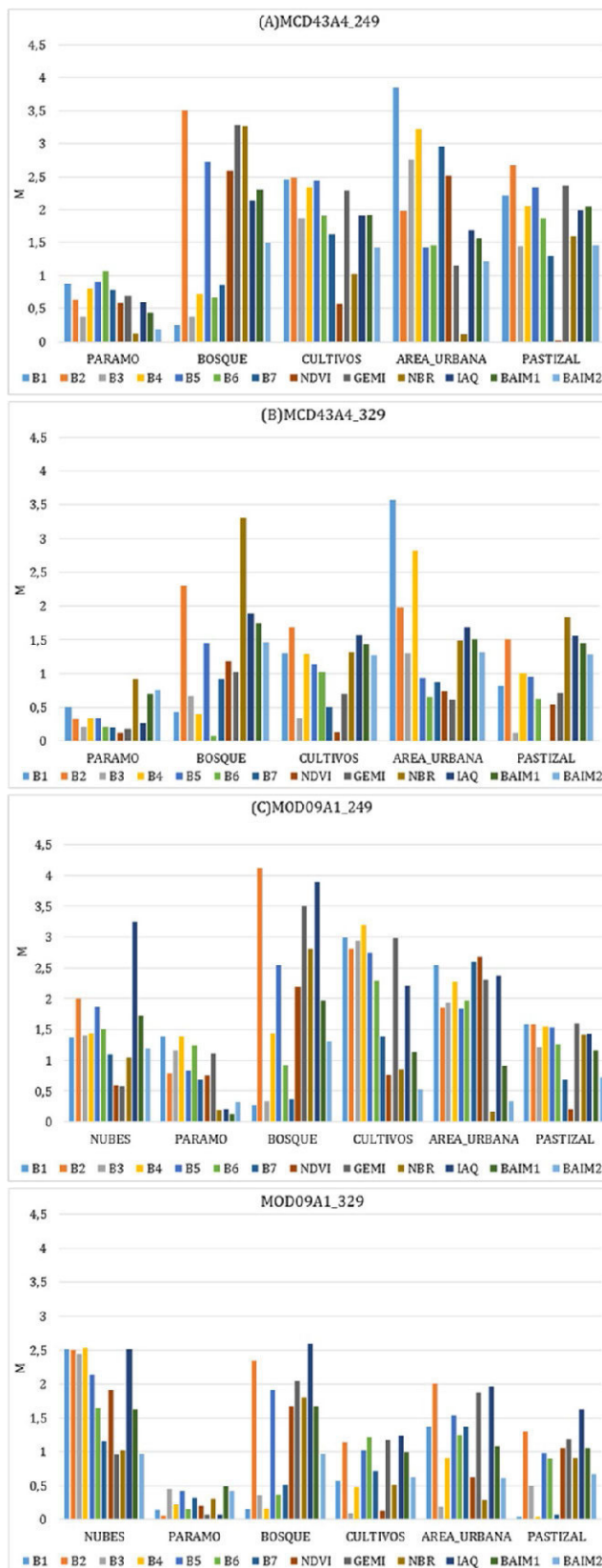


Figura.6 Valores de separabilidad M de las cubiertas analizadas con respecto al área quemada.

- A) producto MCD43A4 de septiembre 2012 (día 249),
- B) producto MCD43A4 de noviembre 2012 (día 329),
- C) producto MOD09A1 de septiembre 2012 (día 249),
- D) producto MOD09A1 de noviembre 2012 (día 329)

En el presente estudio se han analizado los factores más importantes relacionados con la definición de una metodología operativa para la cartografía de incendios forestales en Ecuador a partir de teledetección. Estos factores se refieren al tipo de imágenes, productos, fechas y bandas/índices más adecuados para discriminar espectralmente las áreas quemadas de otras cubiertas naturales y artificiales.

El alcance del presente estudio ha estado limitado por dos factores ajenos al mismo: en primera instancia por la cobertura de nubes existente en las fechas en las que se presenta la época de incendios forestales en la zona de estudio que ha dificultado la obtención de imágenes; en segundo lugar por el tamaño de los incendios ya que la escala a la cual se trabaja con los productos MODIS no permite discriminar incendios pequeños, por lo cual fue preciso ampliar la zona de estudio con el fin de obtener información de siniestros de mayor tamaño.

IV. CONCLUSIONES

Respecto a la selección de imágenes. En el estudio se ha puesto de manifiesto la imposibilidad de abordar la cartografía de incendios en Ecuador mediante imágenes de resolución espacial media-alta del tipo Landsat. La elevada cobertura nubosa impide obtener una serie de imágenes adecuada para esta aplicación desde el punto de vista espacial y temporal. La alternativa más conveniente es recurrir a imágenes de resolución espacial media-baja y temporal alta tipo MODIS. Este tipo de imágenes tienen una frecuencia temporal y resolución espectral adecuada para la cartografía de incendios aunque su resolución espacial limita las posibilidades de obtener información de áreas quemadas sólo para los incendios de mayor tamaño (> 100 ha). En general estos grandes incendios son los que producen mayores pérdidas ambientales y económicas por lo que el interés de obtener una cartografía sistemática y actualizada de estos eventos es evidente.

Respecto a la selección de productos MODIS. Los resultados indican que los productos con y sin corrección del BRDF ofrecen resultados muy similares en cuanto a su capacidad para discriminar áreas quemadas cuando se analizan imágenes adquiridas inmediatamente después de la ocurrencia del incendio. Sin embargo el producto MCD43A4 parece más recomendable cuando se recurre a imágenes adquiridas varios meses después del incendio.

En lo que se refiere a la selección temporal de las imágenes para la cartografía de áreas quemadas, los resultados obtenidos muestran claramente el interés de contar con imágenes adquiridas en fechas lo más próximas posible a la ocurrencia de los incendios, debido a que, con el tiempo, existe una pérdida de los depósitos de carbón y cenizas, dificultando la discriminación de áreas quemadas. Por lo tanto, para una metodología operativa se recomienda analizar todas las imágenes libres de nubes disponibles a lo largo de la estación de incendios.

Por último, en lo que respecta a la información espectral más adecuada para realizar la cartografía, este estudio concluye que las bandas NIR y SWIR son las más adecuadas para la discriminación de áreas quemadas respecto a otras cubiertas de la imagen. Sin embargo, la banda 7 de MODIS presenta una menor separabilidad que las bandas 5 y 6 por lo que se podría plantear el uso de estas bandas en nuevas propuestas de índices adaptados a las características de la zona de estudio. Por la ubicación de los incendios, principalmente en zonas de páramo, existe dificultad al momento de discriminar éstas co-

berturas, por lo que podrían también utilizarse los resultados obtenidos en este trabajo para definir índices específicos que permitan discriminar mejor este tipo de cubierta.

La escasa información existente con respecto a los incendios forestales en la zona de estudio no permitió realizar una cartografía y validación de los resultados obtenidos. Sin embargo, consideramos que los hallazgos metodológicos de este

trabajo servirán de base para posteriores estudios que aborden el análisis de series temporales más largas y zonas más extensas que permita demostrar la posibilidad de utilizar las imágenes MODIS para realizar un seguimiento de la ocurrencia de incendios en Ecuador complementando la información facilitada por las fuentes oficiales.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme las fuerzas que se necesitan para seguir con paso firme por este camino que es la vida.

A la Doctora María del Pilar Martín, por el apoyo incondicional y la transferencia de conocimientos que ha permitido llegar a los objetivos planteados.

Al Ing. Omar Delgado, por su apoyo, tiempo y consideración para lograr culminar con este trabajo de tesis.

A Juan Pablo, mi esposo, por su apoyo constante y por impulsarme siempre a ser mejor.

REFERENCIAS

- Chuvieco, E. et al., 2006. Cartografía global de áreas quemadas en América Latina: experiencias del proyecto AQL2004. XII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica; Cartagena - Colombia. Available at: http://quemadas.cptec.inpe.br/~rquemadas/documentos/200609_chuvieco_et_al_aql2004_12selper_cartagena.pdf.
- García-Mora, T.J. & Mas, J.F., 2011. Evaluación de imágenes del sensor MODIS para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), pp.83-94.
- González, D., Quintano Pastor, C. & Shimabukuro, 2009. Análisis de imágenes basado en objetos aplicado a imágenes fracción derivadas del sensor MODIS para cartografiar áreas quemadas en la cuenca Mediterránea. *Anais do XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Natal-RN*, (978-85-17-00044-7), pp.2737-2743. Available at: <http://mar.tecn.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/10.20.21.29/doc/2737-2743.pdf>.
- González, F. & Merino, S., 2009. Estimación De Superficies Quemadas Mediante Teledetección : Los Incendios De Galicia De Agosto 2006. *Actas de las I Jornadas Técnicas SIGTEFOR, Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 29(1575-2410), pp.39-47. Available at: seforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernossecf/article/.../1086.
- Groot, W.J. De, Flannigan, M.D. & Stocks, B.J., 2012. El Cambio Climático y los Incendios. *Memorias del Cuarto Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Incendios Forestales: Cambio Climático e Incendios Forestales*, pp.1-12. Available at: http://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr245/es/psw_gtr245_001.pdf.
- Heredia Laclaustra, A. et al., 2003. COMPARACIÓN DE DISTINTAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DIGITAL PARA LA CARTOGRAFÍA DE ÁREAS QUEMADAS CON IMÁGENES LANDSAT ETM+. *Geofocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (1578-5157), pp.216-234. Available at: http://geofocus.rediris.es/docPDF/Articulo12_2003.pdf.
- Matín, P., Díaz Delgado, R. & Chuvieco, E., 2002. Burned land mapping using NOAA-AVHRR and TERRA-MODIS. *proceedings: Forest fire*, pp.1-9. Available at: http://www.ebd.csic.es/ricardo/publi/Martin_et_al_2002.pdf.
- Pavón, P.O. & Rodríguez-Verdú, F., 2006. Cartografía de área quemada.
- Pereira, J.M.C., 1999. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1 PART 1), pp.217-226.
- Saldivia, S.O. & Salinero, E.C., 2007. Utilización de productos MODIS para la cartografía de áreas quemadas. , pp.27-43.
- Santis, A. De & Vaughan, P., 2009. Revisión de las técnicas de identificación cartográfica de áreas quemadas. *IBADER: Instituto de Biodiversidad de Agraria e Desenvolvimento Rural*, 5(1885-5547), pp.93-100. Available at: <http://hdl.handle.net/10347/3819>.
- Valenzuela, J.G. et al., 2008. Detección y cuantificación de área quemada por incendios forestales utilizando geomática. *Ambiencia*, 4(2175-9405), pp.107-122. Available at: <http://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/279/372>.
- Verdú, F. & Salas, J., 2010. CARTOGRAFÍA DE ÁREAS QUEMADAS MEDIANTE ANÁLISIS VISUAL DE IMÁGENES DE SATÉLITE EN LA ESPAÑA PENINSULAR PARA EL PERÍODO 1991- 2005. *Geofocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 10(1578-5157), pp.54-81. Available at: http://geofocus.rediris.es/2010/Articulo3_2010.pdf.
- Fallah Ghalhari, G. A., Dadashi Roudbari, A. A., & Asadi, M. (2016). Identifying the spatial and temporal distribution characteristics of precipitation in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(12), 595. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2606-4>
- Wang, X. L., Chen, H., Wu, Y., & Feng, Y. (2010). New Techniques for the Detection and Adjustment of Shifts in Daily Precipitation Data Series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2416-2436. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2376.1>
- Zhang, X., & Srinivasan, R. (2009). GIS-Based Spatial Precipitation Estimation: A comparison of Geostatistical approaches, 45(4), 894-906.