
DETECCIÓN DE CAMBIO AMBIENTAL EN SELVAS Y BOSQUES DE MÉXICO CON PERCEPCIÓN REMOTA: UN ENFOQUE MULTIESCALAR DE ESPACIO Y TIEMPO

LEOPOLDO GALICIA, MARÍA LUISA CUEVAS FERNÁNDEZ,
LAURA MERIT GONZÁLEZ RAMÍREZ y STEPHANE COUTURIER

RESUMEN

El cambio ambiental global es resultado de eventos que ocurren en escalas temporales y espaciales múltiples; sin embargo, los estudios de cuantificación y monitoreo se han limitado a escalas temporales cortas o a estudios en el largo plazo para zonas específicas. El presente trabajo propone una caracterización regional de cambios en la estructura y funcionamiento de selvas y bosques en tres escalas temporales utilizando percepción remota y sistemas de información geográfica, a saber: 1) en escala de corto plazo (1 año) se caracterizó la distribución espacial de los megaincendios ocurridos el año mismo del evento; 2) en escala de mediano plazo (7 años) se analizó la variación anual del índice normalizado de vegetación (NDVI) como un estimador de la

productividad primaria neta; y 3) en escala de largo plazo (20 años) se estudió el patrón de deforestación de la selva baja caducifolia en múltiples sitios. Con este enfoque se caracterizó el fenómeno de El Niño 1997-1998 en México, por medio de imágenes AVHRR, MODIS y Landsat. Se concluye que la caracterización permitió identificar en México impactos inmediatos a escala regional (a través de los megaincendios) y sugirió la existencia de impactos estructurales duraderos de El Niño, a través de una mayor tasa de cambio de cobertura por deforestación de la selva baja caducifolia en periodos que abarcan el fenómeno extremo. No obstante, los impactos funcionales fueron difíciles de discernir con este tipo de aproximación.

El cambio ambiental global es resultado de eventos que ocurren en escalas geográficas planetarias, tales como el calentamiento global y la pérdida de la biodiversidad; y en escalas regionales, como el cambio de uso de suelo, el inadecuado manejo de los recursos y los eventos hidrometeorológicos extremos (incendios, sequías). El entendimiento de la complejidad espacial y temporal en la que ocurren estos fenómenos, y su detección y monitoreo requiere de enfoques en escalas múltiples y

herramientas novedosas. El desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) y la percepción remota (fotografías aéreas, imágenes de satélite en el infrarrojo cercano visible o imágenes de radar) permiten evaluar, diagnosticar y monitorear los procesos que conducen la degradación ambiental (Waser *et al.*, 2008), así como dar seguimiento al cambio de esas características en diferentes escalas de tiempo (días, meses, estaciones y años).

Un fenómeno de variabilidad climática a escala regional como la

Oscilación del Sur El Niño (en adelante 'El Niño'), es capaz de acelerar el proceso de destrucción y degradación de los ecosistemas terrestres en escalas locales y regionales. Se ha observado que existe una sincronización de años excepcionalmente secos causados por la presencia de *El Niño* y la existencia de incendios de grandes magnitudes (Romme *et al.*, 1998; Cochrane 2002; Stolle y Lambin 2003; Roman-Cuesta *et al.*, 2004). En México, los años con la presencia del fenómeno de El Niño intenso coinciden con megain-

PALABRAS CLAVE / Cambios Fenológicos / Deforestación / Megaincendios / NDVI / Percepción Remota / Sistemas de Información Geográfica /

Recibido: 08/03/2013. Modificado: 05/05/2014. Aceptado: 12/05/2014.

Leopoldo Galicia. Licenciado en Geografía y Doctor en Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Profesor, UNAM México. Dirección: Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, UNAM. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán D.F., México. e-mail: lgalicia@igg.unam.mx

María Luisa Cuevas Fernández. Licenciada en Geografía, UNAM, México. M.Sc., University of East Anglia, RU. Consultora, México. e-mail: marilu_cuevas@hotmail.com

Laura Merit González Ramírez. Licenciada y Maestra en Geografía. Especialista en Percepción Remota, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO, México.

Stephane Couturier. Licenciado en Ciencias Espaciales, ENSAE, Francia. Maestro en Percepción Remota, Université de Paris, Francia. Doctor en Geografía, UNAM, México. Doctor en Teledetección de la Biosfera (Université de Toulouse, Francia). Investigador, Instituto de Geografía, UNAM, México. e-mail: andres@igg.unam.mx

cendios (eventos mayores o iguales a las 1000ha incendiadas). Sin embargo, por su amplitud y variabilidad espacial, el efecto atribuible al fenómeno regional El Niño es todavía difícil de discernir en su totalidad y los estudios que analizan su variación geográfica sobre los ecosistemas terrestres son escasos.

Cambios en la productividad primaria neta (PPN) y la fenología de la vegetación son un indicador de la dinámica y el funcionamiento de los ecosistemas terrestres (Paruelo y Lauenroth, 1995; Paruelo *et al.*, 2004; Baldi *et al.*, 2008; Alcaraz-Segura *et al.*, 2009). El estudio de la relación PPN-precipitación a través del índice normalizado de vegetación (NDVI, del inglés *Normalized Difference Vegetation Index*) permite conocer las respuestas fenológicas de la vegetación ante fluctuaciones climáticas o eventos extremos como las sequías, huracanes o años de El Niño. El estudio de amplias regiones geográficas y con alta resolución temporal para evaluar los posibles impactos funcionales del cambio climático y la variabilidad climática en los ecosistemas es viable a partir de la determinación del NDVI, utilizando el insumo de imágenes de baja resolución temporal AVHRR (de *Advanced Very High Resolution Radiometer*) y MODIS (de *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*).

La pérdida de la vegetación por deforestación es la huella más significativa de la destrucción y degradación de los ecosistemas terrestres en los últimos 50 años, particularmente los de las regiones tropicales en América, Asia y África (Waser *et al.*, 2008). La utilización de imágenes de mediana resolución (Landsat y Spot) ha permitido la cuantificación de los cambios en la cobertura de ecosistemas forestales (Dirzo y García 1992; García-Romero *et al.*, 2004), y sus consecuencias en la fragmentación y la pérdida de hábitat (Galicia *et al.*, 2008). Este fenómeno de cambio en la cobertura forestal se presenta de manera generalizada en México y se expresa en diferentes escalas de espacio y tiempo.

Los objetivos del presente estudio fueron 1) caracterizar la distribución espacial de los megaincendios a escala regional bajo años de El Niño en el norte y sur de México, 2) analizar la variación espacial y temporal de la productividad primaria neta (PPN) y su relación con la precipitación anual en el estado de Oaxaca, y 3) analizar la variación espacial y temporal de la deforestación en el ecosistema forestal tropical más extendido en México, la selva baja caducifolia (SBC), en seis zonas contrastantes del país.

Materiales y Métodos

Escala de corto plazo: los megaincendios

El fenómeno de El Niño afecta el patrón de precipitación en México, las lluvias se intensifican durante los años de El Niño en el noroeste y noreste del país, mientras que disminuyen hacia la parte Sur (Magaña, 1999). Por lo tanto, el análisis de la variabilidad de la frecuencia y magnitud de los incendios extensos en el año 1998 se realizó en dos regiones diferentes en cuanto a las consecuencias climáticas de El Niño: la región norte, que incluye a los estados de Tamaulipas, Chihuahua y Durango; y la región sur, que incluye a Oaxaca y Chiapas. Cada megaincendio fue georeferenciado utilizando puntos de calor, incluyendo fecha de detección; localidad, tipo de vegetación afectado y grado de modificación de la vegetación primaria o secundaria. La información de los puntos de calor (píxeles con temperaturas >25°C en las imágenes nocturnas y >42°C en las imágenes diurnas) provienen de las imágenes captadas por el sensor AVHRR de los satélites NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), con una resolución espacial de 1,1km²; y de las imágenes del sensor MODIS de los satélites terra-1 y aqua-1, con tres resoluciones (250, 500 y 1000m) (CONABIO, 2004).

Escala temporal de plazo intermedio: análisis del NDVI

En la segunda etapa se realizó un análisis a escala temporal de plazo intermedio, considerando el impacto del fenómeno El Niño de 1997-1998 en el estado de Oaxaca. Este estado posee una gran biodiversidad producto del gradiente altitudinal y su compleja topografía, lo que permite evaluar el impacto del fenómeno El Niño sobre el funcionamiento de los diferentes ecosistemas presentes allí. Se estima que el Estado de Oaxaca alberga el 10,2% de los bosques y el 8,5% de las selvas a nivel nacional (INEGI, 2002). Oaxaca alberga en su territorio 72 tipos de vegetación reconocidos por INEGI, que incluye vegetación primaria y secundaria. Debido a la complejidad de hábitats, la vegetación se reclasificó tomando en cuenta la división propuesta por Lorence y García (1989) y los grandes grupos propuestos por INEGI (2002). Los 72 tipos de vegetación con las cuales el INEGI divide al Estado de Oaxaca fueron reclasificados en 15 tipos. Para estimar si la función de los ecosistemas fue significativamente afectada por el fenómeno El Niño 1997-1998, se analizó la respuesta fenológica de estos ecosistemas en el estado de Oaxaca en los 5 años posteriores al fenómeno. Se proce-

saron y analizaron 2008 imágenes diarias AVHRR de los satélites NOAA 12, NOAA, 14 y NOAA 16 con una resolución de 1,1km² de 1997 al 2003, de 15 tipos de vegetación. Se calculó el índice de vegetación NDVI, el cual se basa en la relación entre la respuesta de la vegetación en el canal rojo visible y la respuesta al infrarrojo cercano. Para cada píxel se obtuvo un valor entre -1 y +1 aplicando la fórmula

$$NDVI = \frac{(\text{infrarrojo cercano} - \text{rojo})}{(\text{infrarrojo cercano} + \text{rojo})}$$

Con el NDVI para cada imagen se crearon compuestos de cada 10 días en el programa ENVI, con la finalidad de obtener imágenes más claras y eliminar el ruido atmosférico. En total se generaron y analizaron 228 compuestos para los siete años estudiados.

Escala temporal de largo plazo: deforestación de la SBC

El estudio a escala temporal de largo plazo se llevó a cabo en la Selva Baja Caducifolia (SBC) abarcando las décadas de 1980, 1990 y 2000 (Tabla I). La SBC es el ecosistema forestal tropical más amenazado en México y cubre el 60% de la selva tropical en el país. Se eligieron seis zonas con amplia cobertura de SBC y con causas directas de cambio de uso de suelo relacionadas con una diversidad de actividades humanas (ganadería, agricultura de temporal, agricultura de riego, turismo). Para el análisis del cambio de cobertura de la SBC se compararon mapas de vegetación generados a partir de imágenes Landsat de las seis zonas. Imágenes Landsat MSS y TM para las décadas de 1980 y 1990 e imágenes Landsat ETM+ para los años 2000, disponibles en la página web de la U.S. Geological Survey (USGS). En todas las zonas se pudieron adquirir imágenes en tres fechas excepto en Tulum, en donde por la abundancia de nubosidad solamente dos fechas estaban disponibles. Se aplicó una corrección geométrica de imágenes con el programa ENVI con corrección automática de al menos 60 puntos de referencia de otra imagen ya corregida. Se procedió a la clasificación no supervisada ISODATA de las imágenes para la discriminación de clases por conjuntos espectrales. Se recurrió a la información de cartografía previa o a estudios anteriores (Velázquez *et al.*, 2003) en las zonas de estudio para definir entre los conjuntos espectrales sitios de entrenamiento de diferentes clases, simplificando las clases vía un estudio de separabilidad espectral.

Los resultados se evaluaron con sitios de verificación en cada zona con recorridos de campo, con estudios previos en la literatura o con cartografía

TABLA I
MATERIALES PARA EL ESTUDIO DE DEFORESTACIÓN DE LA SELVA BAJA CADUCIFOLIA *

Estado	Municipios	Disponibilidad de imagen Landsat	Actividad humana de impacto reconocido sobre la cobertura forestal (directo o indirecto)
Sonora	Los Álamos	1986,1992, 2006	Ganadería
Sinaloa	El Fuerte	1986, 1992, 2006	Agricultura de temporal y de riego
Jalisco	La Huerta Tomatlán Cihuatlán Cabo Corrientes	1990, 2000, 2003	Agricultura de riego (proyecto hidroeléctrico)
Oaxaca	Santa María Huatulco San Pedro Pochutla	1985, 1995, 2006	Agricultura de temporal y actividad turística de baja intensidad (desde años 2000)
Quintana Roo	Tulum	1993, 2000	Agricultura de temporal y actividad turística de alta intensidad (desde años 1990)

La zona de estudio abarca la parte de estos municipios donde prevalece la Selva Baja Caducifolia, debajo de la curva de nivel de los 800msnm.

existente (Miranda, 2002; Velázquez *et al.*, 2003; Castillo-Campos *et al.*, 2007). Utilizando las superficies clasificadas en cada fecha, las tasas de deforestación se calcularon en las seis zonas estudiadas, de acuerdo con la ecuación propuesta por Dirzo y García (1992):

$$t = \left(1 - \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1} \right)^{1/n} \right) - 1$$

donde t: tasa de cambio, S₁: superficie de bosque en la fecha 1; S₂: superficie de bosque en la fecha 2; n: número de años entre las dos fechas. La tasa expresa el cambio en porcentaje de la superficie al inicio de cada año por lo que se puede interpolar la superficie de la selva cada año. Para efectos de comparación entre periodos y sitios, se derivaron tasas de deforestación en los periodos 1985-1990, 1990-1995, 1995-2000 y 2000-2005.

Resultados

Distribución de los megaincendios

La distribución de los megaincendios por regiones fue diferente entre la región norte y la región sur (Tabla II). En la región norte la frecuencia de los megaincendios fue baja en el periodo de análisis, los registros más altos se presentaron en el año 1998 con 21 eventos, seguido por el año 1999 con ocho eventos, en tanto que el resto del periodo de análisis su presencia fue prácticamente nula. En la región sur del país el mayor número de megaincendios se registró en el año 1998 con 88 eventos, confirmando la presen-

cia de El Niño intenso. Otros años con megaincendios en esta región fueron en el 2003 y 2005; estos años presentaron eventos de El Niño pero la intensidad de este fenómeno fue moderada (Tabla II). Los resultados confirman que en ambas regiones la mayor frecuencia se relaciona con la presencia de El Niño intenso del año 1998, mientras que en años posteriores la frecuencia fue variable.

La superficie incendiada y su frecuencia tuvieron diferencias marcadas con otros años. En 1998 se presentaron 109 eventos y de 1999 al 2006 se presentaron 56 megaincendios. Además, la superficie incendiada en la región sur es cinco veces mayor en 1998 que en 2002, que fue uno de los años más afectados, pero donde no tuvo lugar el evento de El Niño.

Los tipos de vegetación afectada por los megaincendios en el sur fueron: bosque templado (pino, encino, pino-encino y encino-pino); bosque tropical (selva alta y mediana perennifolia, selva baja caducifolia), zonas agropecuarias y pastizales. La vegetación afectada por los megaincendios en la región norte fueron: bosques templados (bosque de pino, bosque de

encino, bosque de pino-encino, bosque de encino-pino), zonas agropecuarias, bosque mesófilo de montaña, matorral xerófilo y pastizales (Figura 1).

Análisis temporal y distribución espacial del NDVI

Los valores del NDVI como un descriptor de la PPN en los 15 tipos de vegetación estudiados fueron mayores en 1997, 2002 y 2003 en relación con 2000 y 2001, sugiriendo una mayor PPN en esos años (Figura 2). La variación del NDVI entre años parece estar correlacionada con las fluctuaciones anuales de precipitación; por ejemplo, en el 2000 la cantidad de lluvia registrada fue significativamente menor que en 1997 y 1998. Por otro lado, las selvas altas y medianas en general, y las perennes en particular, fueron la vegetación con mayor PPN en todos los años, mostrando valores promedio de NDVI entre 0,3 y 0,6 (Figura 2). En contraste, en la misma figura se puede observar que los matorrales y chaparrales, el bosque de táscate y los pastizales inducidos fueron los tipos de vegetación con los valores más bajos de NDVI (entre 0,1 y 0,5) a lo largo de los siete años.

El patrón espacial de la precipitación y de la distribución de la vegetación indican que en la parte norte y noreste del estado de Oaxaca se localizan la mayor parte de los bosques templados, selvas altas y medianas, lo cuales presentaron los valores promedio más altos de NDVI (entre 0,277 y 0,9) debido a la mayor precipitación (>2000 mm/año) (Figura 3). En contraste, la parte centro donde la vegetación predominante son los matorrales xerófitos y la vegetación inducida como los pastizales y cultivos, presentó los valores más bajos de NDVI (-0,80) y de precipitación (500-800 mm/año) con una alta variación temporal en el periodo de estudio (Figura 3). En la parte oeste, con la presencia de bosques mesófilos, de pino y de encino registró valores de NDVI intermedios (0,23 y 0,42) con una precipitación anual de 1000-1500 mm/año.

Análisis espacial y temporal de la deforestación de la SBC

Las tasas de deforestación fueron heterogéneas entre periodos y sitios (Tabla III). La tendencia general indica un máximo de la tasa de deforestación (1,5%) entre 1995-1999. En el periodo 1995-1999 la tasa fue mayor en la región noroeste (Tabla III). En términos de pérdida total de selva baja entre 1980 y 2000 las zonas con incidencia de agricultura de riego tuvieron mayor pérdida, sugiriendo que la agricultura de riego tuvo mayor

TABLA II
DISTRIBUCIÓN ANUAL DE LOS MEGAINCENDIOS POR ESTADO *

	Chiapas	Oaxaca	Chihuahua	Durango	Tamaulipas
1998	29	59	1	15	5
1999	0	3	5	3	0
2000	4	1	2	1	0
2001	3	0	0	0	0
2002	0	5	1	0	0
2003	11	3	1	0	0
2004	0	0	1	0	0
2005	3	5	0	1	0
2006	1	0	1	0	1

* Sombra oscura años de El Niño, sombra clara años de La Niña.

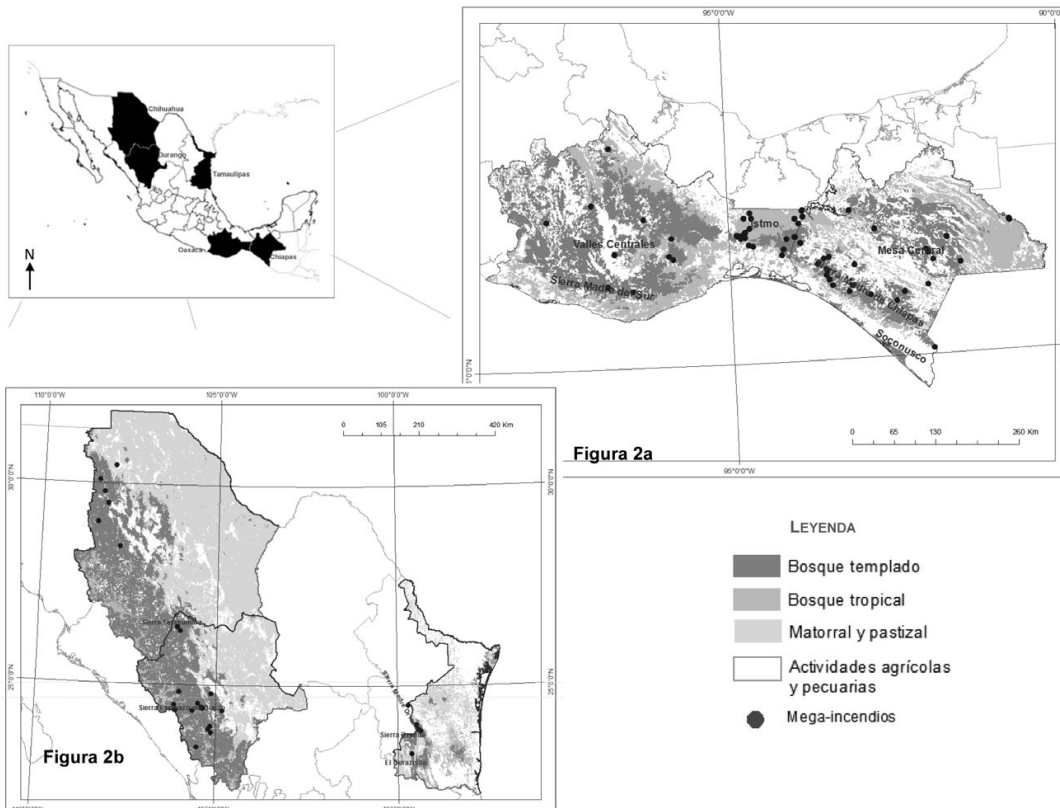


Figura 1. Distribución espacial de los puntos de calor de 1998 a 2005 en los estados de Oaxaca y Chiapas en el sur de México (a) y Chihuahua, Durango, Tamaulipas en el norte (b).

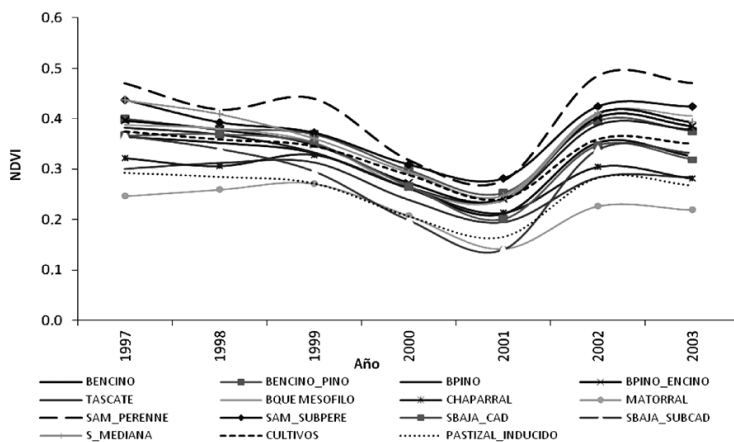


Figura 2. Valores promedio en los siete años estudiados (1997-2003) del NDVI de los 15 tipos de vegetación estudiados en el estado de Oaxaca.

impacto que otras actividades como la ganadería o la agricultura de temporal. No obstante, este análisis global por periodo no debe esconder la gran variabilidad de procesos entre los municipios considerados, que a continuación abordamos.

La distribución espacial de las tasas de deforestación fue heterogénea a escala municipal. En la región noroeste, en el municipio El Fuerte, Sinaloa, la cobertura de la SBC fue del 68,2% en 1986 reduciéndose a 56,4% en 2006. La

las actividades antrópicas se incrementaron en el 2006 respecto a su área en 1986: la agricultura de riego en un 2%; la agricultura de temporal con el 4% y los pastizales con el 4,4%. En la región de la costa de Jalisco el 13% de la cobertura vegetal presentó cambios de uso del suelo entre 1990 y 2000. La tasa de deforestación fue todavía mayor entre 2000 y 2003, con un área deforestada neta de ~22000ha, principalmente relacionada con proyectos aledaños a una presa hidroeléctrica. En la re-

gión del pacífico sur, los municipios de San Pedro Pochutla y Santa María Huatulco, Oaxaca, la SBC tuvo una reducción de ~6000ha a una tasa de 1,0% anual en el periodo 1985-1995; pero un incremento de ~2000ha a una tasa de -0,3% anual en el periodo 1995-2006. En la región del caribe el municipio de Tulum presentó una reducción en la extensión de la SBC entre 1993 (88%) y 2000 (81%); en tanto que el área agrícola se incrementó del 7,3% al 12%. El cambio más importante se presentó en la clase infraestructura, la cual aumentó en 50% su superficie inicial de 1993.

Discusión

La percepción remota y los sistemas de información geográfica permitieron detectar tres procesos de cambio ambiental que operan en diferentes escalas de espacio y tiempo. El reto de transformar la información espectral en variables biológicas relevantes es clave para detectar patrones de degradación y monitoreo de procesos ecológicos (fenología) y geográficos (uso de suelo), y evaluar las respuestas rápidas e históricas de los ecosistemas a través de la detección en los cambios de cobertura y el NDVI.

El monitoreo espacio-temporal anual de los megaincendios permitió identificar la variación espacial de la frecuencia y magnitud, y que El Niño se manifiesta diferencialmente en el territorio mexicano (Figura 1, Tabla II). En el norte, los años de El Niño tienden a ser más húmedos de lo normal porque el paso de frentes fríos en el norte y centro del país se incrementa (Magaña, 1999). En contraste, en el sur del país El Niño comúnmente induce la presencia de cantidades anormalmente bajas de precipitación, lo cual puede incrementar la presencia de megaincendios. La alta frecuencia de megaincendios en años de El Niño indica que las condiciones meteorológicas y de la vegetación deben ser monitoreadas con detalle en todo el país, implementando un sistema de alerta a nivel nacional con la utilización de herramientas de análisis que en este artículo presentamos.

Asimismo, en México, de acuerdo con las cifras oficiales de Semarnat y Conafor el área quemada anualmente

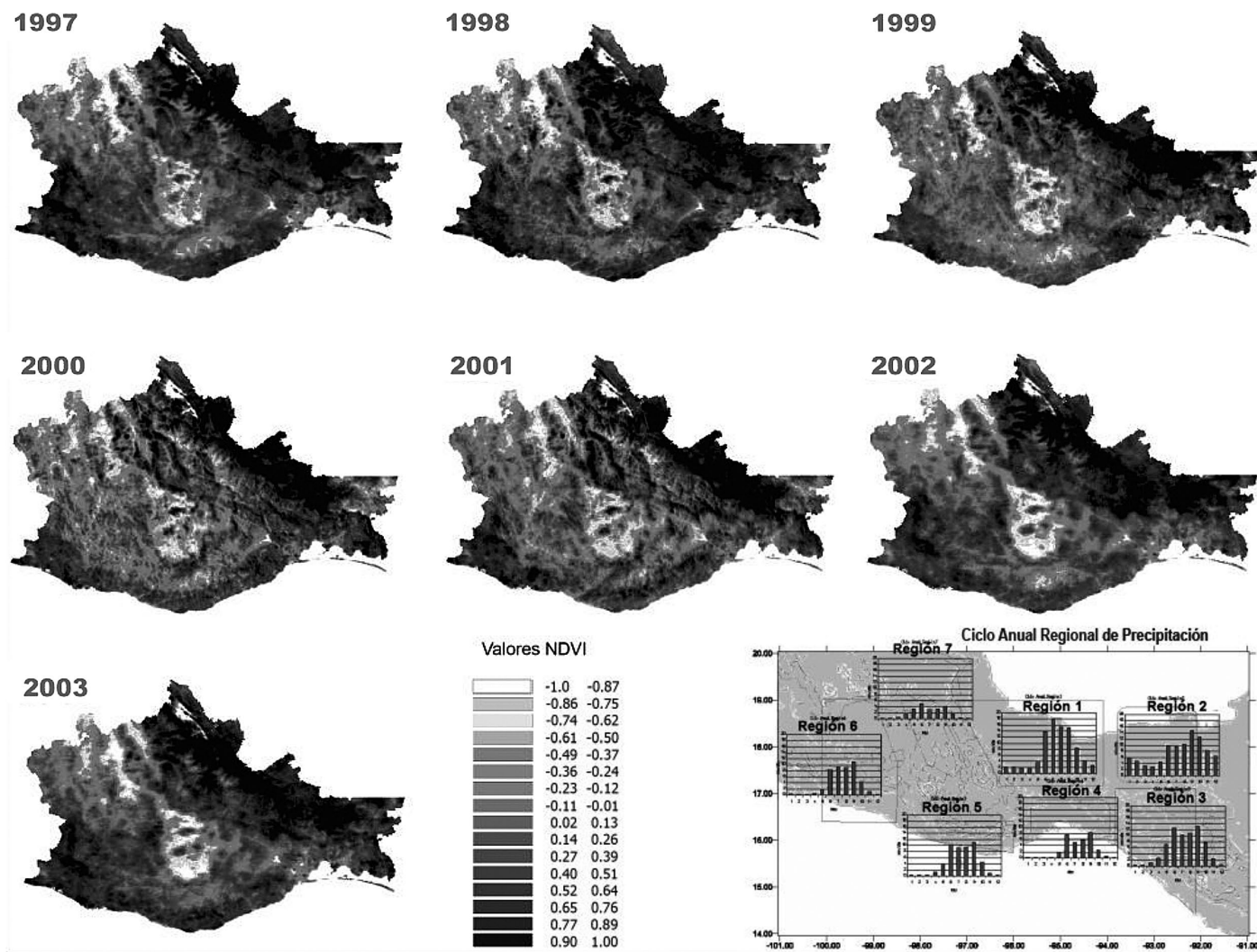


Figura 3. Valores promedio en los siete años estudiados (1997-2003) en el estado de Oaxaca, México.

muestra una tendencia de aumento (Manson y Jardel, 2009), en los 70's la superficie incendiada fue de 1,582,040ha; pero en las dos décadas siguientes se reportan superficies $>2 \times 10^6$ ha afectadas: 2,579,760 en los 80 y 2,516,979 en los 90. En los años recientes, es más frecuente que las condiciones climáticas sean afectadas por eventos de El Niño,

el cual favorece las condiciones de sequía que inducen el incremento de las áreas afectadas por incendios en cada una de las regiones. Román-Cuesta y Martínez-Villalta (2006) han encontrado que las quemas son más recurrentes al sur de México a partir de la sequía en 1982-1983. Los años 1983, 1988 y 1998 corresponden con índices posi-

tivos del fenómeno de El Niño en México, y éste se asocia a condiciones anómalas de precipitación, así como a la alta incidencia de incendios (Magaña, 1999; Palacio-Prieto *et al.*, 1999).

El monitoreo de mediano plazo mostró que la PPN varió marcadamente entre los siete años de estudio (Figura 3).

TABLA III
TASAS DE DEFORESTACIÓN DE LA SELVA BAJA CADUCIFOLIA POR SITIO Y POR PERIODO*

Estado	Municipios	Tasa 1985-1989	Tasa 1990-1994	Tasa 1995-1999	Tasa 2000-2004	Actividad humana
Sonora	Los Álamos	0,7%	1,1%	1,7%	0,2%	Ganadería para exportación
Sinaloa	El Fuerte	0,9%	1,5%	2,3%	0,1%	Agricultura temporal y de riego
Jalisco	La Huerta, Tomatlán, Cihuatlán, Cabo Corrientes	-	1,4%	1,4%	2,7%	Agricultura de riego (proyecto hidroeléctrico)
Oaxaca	Santa María Huatulco San Pedro Pochutla	1,0%	1,0%	-0,3%	-0,3%	Agricultura de temporal y actividad turística
Quintana Roo	Tulum	-	1,3%	1,3%	-	Agricultura de temporal y actividad turística
	Todos sitios	0,9%	1,3%	1,5%	0,8%	

* Cifras negativas se refieren a recuperación de la selva.

ra 2). Por ejemplo, 1997 y 1998 fueron los años con mayor PPN, y 2000 y 2001 fueron los años con menor PPN; estas diferencias interanuales pueden deberse a que la cantidad de precipitación de 1997 y 1998 fue ocho veces mayor que la de 2000. Por otra parte, el monitoreo del NDVI mostró que los ciclos fenológicos de los 15 tipos de vegetación parecen estar respondiendo claramente a los patrones de precipitación y la disponibilidad de agua, ya que el comportamiento del NDVI es constante y similar entre años para la vegetación perenne, mientras que la vegetación caducifolia presenta claramente una época de crecimiento y senescencia. El cambio en las condiciones de disponibilidad de agua puede ser fácilmente detectado a través del estudio sistemático de la variabilidad intra-anual del NDVI, lo cual es esperable bajo escenarios de cambio climático. La resolución espacial y temporal del NDVI permite establecer la hipótesis que a escalas regionales la cantidad de precipitación anual está relacionada positivamente con la productividad primaria neta (Wang *et al.*, 2003), en tanto que la hipótesis de una influencia del fenómeno El Niño sobre la PPN no se observó en los años siguientes al fenómeno.

El análisis de largo plazo del cambio de uso de suelo permitió identificar la heterogeneidad espacial del cambio, las causas y la dirección del mismo a lo largo de 30 años (Tabla III). La magnitud de pérdida de SBC en los municipios de Los Álamos (~53800ha en el periodo 1992-2000) y El Fuerte (~29809ha) en el norte del país fue mayor en un orden de magnitud que, por ejemplo, los municipios San Pedro Pochutla (3814ha en el periodo 1985-1995) y Santa María Huatulco (2151ha en el periodo 1985-1995) en el sur (Tabla I). Las diferencias en las tasas de deforestación y magnitud de pérdida de cobertura de la SBC en el periodo 1986-2006 sugieren que el mayor desarrollo tecnológico y sistemas de producción agrícola de exportación de las regiones del norte son un causante importante de cambio de uso de suelo comparado con otros causantes como la actividad agrícola de subsistencia (Tabla I).

Por otra parte, la detección de largo plazo permitió identificar periodos de deforestación y recuperación de la cobertura vegetal. Las altas tasas de deforestación ocurrieron en los años 1990, pero a inicios de los años 2000 existe una tendencia a la disminución de las tasas de deforestación. Los periodos de deforestación de este ecosistema están asociados a una expansión gradual de las áreas cultivadas en los trópicos, que representa una perturbación amplia y de largo plazo relacionada con políticas públicas. En contraste, se consideró que a partir del 2000 el abandono y

el descanso de la agricultura de temporal fue la principal causa de la regeneración de la SBC. El proceso de descanso de la tierra por un periodo de 10-15 años permite la regeneración de la vegetación y los nutrientes del suelo; permitiendo a las parcelas estar listas para ser utilizadas nuevamente (Soto *et al.*, 1992; Noble y Dirzo, 1997; Bocco *et al.*, 2001; Kennard, 2002).

Conclusiones

En el contexto del cambio ambiental global, el detectar y analizar los procesos de degradación ambiental a escala regional es una tarea imprescindible, en particular para la evaluación de los impactos de actividades humanas. En México, la tendencia en la literatura científica ha sido de dos tipos de estudios; la cuantificación de daños inmediatos asociados a estos fenómenos (Magaña, 1999; Fuller y Murphy, 2006), o crono-secuencias acotadas a una escala espacial micro-regional en Latino-América (Schultz *et al.*, 2010; Mendoza *et al.*, 2011). Proponemos que un esquema que utilice de manera sinérgica la alta resolución temporal de los sensores AVHRR y MODIS AVHRR y MODIS, y la mejor resolución espacial del sensor Landsat, es imperativo para una caracterización más sintética, quizás más susceptible de un monitoreo acorde a las necesidades de estimación de impactos a nivel nacional. Además, la combinación de los sensores remotos aunados a un análisis por SIG permite tener una caracterización a tres escalas temporales (menor a un año, 5 años y dos décadas), que atañe tanto a la estructura como a la función de los ecosistemas terrestres. La detección acumulada anual de megaincendios es un medio rápido, poco costoso de caracterizar el cambio ambiental regional a escala temporal corta. El análisis del NDVI diario de los sensores AVHRR y/o MODIS en el estado de Oaxaca permite obtener la respuesta fenológica interanual, una característica funcional de una muestra altamente diversa de los ecosistemas terrestres en México. La utilización de imágenes Landsat en plazos de décadas y en escalas espaciales más acotadas para una muestra representativa de actividades humanas en el país, ha permitido el estudio de la deforestación a escala regional para un ecosistema forestal emblemático, susceptible de deterioro por el fenómeno. Por lo tanto, el esquema propuesto permite un análisis multiescalar en términos temporales y espaciales, y es susceptible de fungir como una herramienta de caracterización útil, de bajo costo, y reproducible en futuros eventos hidrometeorológicos extremos, para organismos nacionales encargados de monitorear cambios ambientales en el país.

REFERENCIAS

- Alcaraz-Segura A, Cabello D, Paruelo JM, Delibes M (2009) Use of descriptors of ecosystem functioning for monitoring a National Parks Network: A remote sensing approach. *Environ. Manag.* 43: 38-48.
- Baldi G, Noretto MD, Aragón R, Aversa F, Paruelo JM, Jobbágy EG (2008) Long-term satellite NDVI datasets: Evaluating their ability to detect ecosystem functional changes in South America. *Sensors* 8: 5397-5425
- Bocco G, Masera O, Mendoza M (2001) La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Inv. Geogr.* 44: 18-38.
- Castillo-Campos G, Dávila-Aranda P, Zavala-Hurtado JA (2007). La selva baja caducifolia en una corriente de lava volcánica en el centro de Veracruz: Lista florística de la flora vascular. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 80: 77-104.
- Cochrane MA (2002) *Se Extienden como un Reguero de Pólvora, Incendios en Bosques Tropicales en América Latina y el Caribe: Prevención, Evaluación y Alerta Temprana*. Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México. 96 pp.
- CONABIO (2004) *Puntos de calor (1999-2006)*. Comisión Nacional para el Conocimiento de la Biodiversidad. México. www.conabio.gob.mx
- Dirzo R, García MC (1992) Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a Neotropical area in southeast Mexico. *Cons. Biol.* 6: 84-90.
- Fuller DO, Murphy K (2006) The ENSO-fire dynamic in insular Southeast Asia. *Climat. Change* 74: 435-455.
- Galicia L, Zarco-Arista AE, Mendoza-Robles KI, Palacio-Prieto JL, García-Romero A (2008) Land use/land cover change, landforms and fragmentation patterns in a tropical deciduous forest in southern Pacific, Mexico. *Sing. J. Trop. Geogr.* 29: 137-154.
- García-Romero A, Orozco O, Galicia L (2004) Land-use systems and resilience of tropical rainforests in the Tehuantepec Isthmus, Mexico: *Environ. Manag.* 34: 768-785.
- INEGI (2002) *Carta de Uso de Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000 Serie II. Conjunto de Datos Vectoriales*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
- Kennard D (2002) Secondary forest succession in a tropical dry forest: patterns of development across a 50-year chronosequence in lowland Bolivia. *J. Trop. Ecol.* 18: 53-66.
- Lorence DH, García MA (1989) Oaxaca, México. En Campbell DG, Hammond HD (Eds.) *Floristic Inventory of Tropical Countries*. The New York Botanic Garden, pp. 243-268.
- Magaña VO (1999) *Los Impactos de El Niño en México*. Universidad Nacional Autónoma de México-Secretaría de Gobernación. México. pp 219 pp.
- Manson RH, Jardel-Peláez E (2009) Perturbaciones y desastres naturales: impactos sobre las ecorregiones, la biodiversidad y el bienestar socioeconómico. En *Capital Natural de México*. Vol. II: *Estado de Conservación y Tendencias de Cambio*. Conabio. México. pp. 131-184.
- Mendoza ME, Granados EL, Geneletti D, Pérez-Saliciup DR, Salinas V (2011) Analysing land cover and land use change processes at watershed level: A multitemporal study in the Lake Cuitzeo Watershed, Mexico (1975-2003). *Appl. Geogr.* 31: 237-250.

- Miranda A (2002) Diversidad, historia natural, ecología y conservación de los mamíferos de Chamela. En Noguera FA, Vega-Rivera JH, García-Aldrete AN, Quesada M (Eds.) *Historia Natural de Chamela*. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 359-377.
- Noble I, Dirzo R (1997) Forests as human dominated ecosystems. *Science* 277: 522-525.
- Palacio-Prieto JL, Luna-González L, Macías-Morales L (1999) Detección de incendios usando imágenes AVHRR (Temporada 1998). *Inv. Geogr.* 38: 7-14.
- Paruelo JM, Lauenroth WK (1995) Regional patterns of normalized differences vegetation index in North American shrublands and grasslands. *Ecology* 76: 1888-1898.
- Paruelo JM, Garbulsky MF, Guerschman JP, Jobbágy EG (2004) Two decades of Normalized Difference Vegetation Index changes in South America: identifying the imprint of global change. *Int. J. Rem. Sens.* 25: 2793-2806.
- Román-Cuesta RM, Martínez-Vilalta J (2006) Effectiveness of protected areas in mitigating fire within their boundaries: case study of Chiapas, Mexico. *Cons. Biol.* 20: 1074-1086.
- Román-Cuesta RM, Gracia M, Retana J (2004) Fire trends in tropical Mexico: a case study of Chiapas. *J. Forestry* 102: 26-32.
- Romme W, Everham EH, Frelich LE, Moritz MA, Sparks RE (1998) Are large, infrequent disturbances qualitatively different from small, frequent disturbances? *Ecosystems* 1: 524-534.
- Schulz JJ, Cayuela L, Echeverría C, Salas J, Rey Benayas JM (2010). Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975–2008). *Appl. Geogr.* 30: 436-447.
- Soto C, Fuentes L, Coll A (1992) *Geografía Agraria de México*. Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de Geografía - CONACYT, México. 273 pp.
- Stolle F, Lambin EF (2003) Interprovincial and interannual differences in the causes of land-use fires in Sumatra, Indonesia. *Environ. Cons.* 30: 375-387.
- Velázquez A, Durand E, Ramírez I, Mas J, Bocco G, Ramírez G, Palacio-Prieto JL (2003) Land use-cover change processes in highly biodiverse areas: the case of Oaxaca, Mexico. *Global Environ. Change* 13: 175-184.
- Vitousek PM, Mooney HM, Lubchenco J, Melillo J (1997) Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277: 494-499.
- Wang J, Rich PM, Price KP (2003) Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *Int. J. Rem. Sens.* 11: 2345-2364.
- Waser LT, Baltasvias E, Ecker K, Eisenbeiss, H, Feldmeyer-Christe E, Ginzler C, Küchler M, Zhang L (2008) Assessing change forest area and shrub encroachment in a mire ecosystem using digital surface models and CIR aerial images. *Rem. Sens. Environ.* 112: 1956-1968.
- Wessman CA (1992) Spatial Scales and global change: bridging the gap for plots to GCM and grill cell. *Annu. Rev. Ecol. System.* 23: 175-200.

DETECTION OF ENVIRONMENTAL CHANGE IN JUNGLES AND FORESTS OF MEXICO WITH REMOTE SENSING: A MULTI-SCALE TIME AND SPACE APPROACH

Leopoldo Galicia, María Luisa Cuevas Fernández, Laura Merit González Ramírez and Stephane Couturier

SUMMARY

Global environmental change occurs at multiples scales, and is sometimes magnified by extreme hydro-meteorological events. However, due to the amplitude of the phenomenon, efforts for impact quantifications have often been limited to short time scales or long time studies at a single site. The current work proposes a regional characterization of impacts at three temporal scales using available remote sensing inputs, with emphasis on the structure and function of terrestrial ecosystems. At a short time scale (a) the event is described by the spatial distribution of mega-fires that occurred the same year as the event; at a medium time scale (b; until 7 years after the event), the annual variation of Net Primary Productivity (NPP) or Normalized Difference Vegetation

Index (NDVI) of each ecosystem is analyzed in the region most affected by the mega-fires. Finally, at a longer time scale (c; 20 years, including the event), the pattern of degradation of an ecosystem is studied in multiple sites throughout the region. The ENSO 1997-1998 phenomenon was characterized in Mexico using AVHRR, MODIS and Landsat imagery with this approach. It is concluded that immediate impacts could be identified at regional scale using low resolution sensors. Next, sustained structural degradation could be linked to the ENSO event in the form of higher deforestation rates in periods which include the event. By contrast, functional impacts are probably not discernable with this type of inputs in Mexico.

DETECÇÃO DE MUDANÇA AMBIENTAL NAS SELVAS E BOSQUES DO MÉXICO COM PERCEPÇÃO REMOTA: UM ENFOQUE MULTIESCALAR DE ESPAÇO E TEMPO

Leopoldo Galicia, María Luisa Cuevas Fernández, Laura Merit González Ramírez e Stephane Couturier

RESUMO

A mudança ambiental global é resultado de eventos que ocorrem em escalas temporais e espaciais múltiplas; no entanto, os estudos de quantificação e acompanhamento têm se limitado a escalas temporais curtas ou a estudos de longo prazo para áreas específicas. O presente trabalho propõe uma caracterização regional de mudanças na estrutura e funcionamento de selvas e bosques em três escalas temporais utilizando percepção remota e sistemas de informação geográfica, como segue: 1) na escala de curto prazo (1 ano) se caracterizou a distribuição espacial dos mega incêndios ocorridos no mesmo ano do evento; 2) na escala de médio prazo (7 anos) se analisou a variação anual do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) como

um estimador da produtividade primária neta; e 3) na escala de longo prazo (20 anos) se estudou o padrão de deflorestação da selva baixa caducifólia em múltiplos locais. Com este enfoque se caracterizou o fenômeno de El Niño 1997-1998 no México, por meio de imagens AVHRR, MODIS e Landsat. Conclui-se que a caracterização permitiu identificar no México impactos imediatos na escala regional (a través dos mega incêndios) e sugeriu a existência de impactos estruturais duradouros de El Niño, a través de uma mais elevada taxa de câmbio da cobertura por deflorestação da selva baixa caducifólia em períodos que abarcam o fenômeno extremo. No entanto, os impactos funcionais foram difíceis de discernir com este tipo de aproximação.