

# MONITOREO DE LA COBERTURA DE SUELO EN MÉXICO DERIVADA DE IMÁGENES MODIS ENTRE 2005–2011

Cartografía y tecnologías de la información geográfica

Ricardo M. Llamas\*, René R. Colditz

Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (Conabio), Av. Liga Periférico-Insurgentes Sur 4903, Col. Parques del Pedregal, Del. Tlalpan, 14010, México D.F. \*Primer autor  
[rllamas@conabio.gob.mx](mailto:rllamas@conabio.gob.mx) Tel: +52-55-50044975

La cobertura de suelo es uno de los elementos más importantes en los inventarios de recursos naturales de un país, así como un indicador de la presión ejercida sobre el medio ambiente. En los últimos años, el monitoreo de la cobertura de suelo ha cobrado mayor importancia debido a su trascendencia en la modelación del cambio climático, estudios de expansión urbana y pérdida de vegetación, entre otros. Como parte de los esfuerzos para mapear la cobertura de suelo, se han desarrollado proyectos alrededor del mundo que ofrecen resultados en diferentes escalas de análisis. Sin embargo, las inconsistencias entre productos, derivadas de distintas resoluciones en los insumos o la temporalidad de los datos, hacen que la comparación entre diferentes fuentes pierda relevancia.

La Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA, por sus siglas en inglés) coordina el trabajo de varias instituciones de México, Estados Unidos y Canadá en el Sistema de Monitoreo del Cambio en la Cobertura de Suelo de América del Norte (NALCMS, por sus siglas en inglés). En este proyecto, cada país genera la cartografía base de cobertura de suelo en su territorio, utilizando los mismos insumos para toda la región, métodos de clasificación similares, leyenda estandarizada, y fusionando los mapas independientes en un producto trinacional.

El proceso de monitoreo se efectúa con técnicas automatizadas mediante la actualización de un mapa base en áreas identificadas como cambio potencial. El mapa base se realizó con imágenes del año 2005 del sensor MODIS con resolución espacial de 250m. La asignación de clases de cobertura se efectuó mediante un clasificador basado en árboles de decisión, utilizando datos de entrenamiento extraídos de puntos georreferenciados con información de la cobertura en todo el país. Para los años posteriores, la identificación de zonas de cambio potencial se realiza calculando la diferencia bianual entre la información espectral de las imágenes del año a cartografiar y el año anterior. En un segundo paso, se obtiene la clase de cobertura de suelo para el año de la actualización, mediante un nuevo proceso de clasificación sólo dentro de las áreas de cambio potencial, utilizando información de los píxeles vecinos como datos de entrenamiento. Una vez generada la actualización del mapa, la suma de aquellos píxeles que cambiaron a una nueva clase es reportada como cambio real. De esta manera, se generan los mapas anuales de la cobertura de suelo en México para el periodo 2005-2011. La cartografía producida cuenta una leyenda estandarizada, lo que permite derivar estadísticas del cambio por tipo de cobertura tanto a nivel trinacional como regional y para sitios específicos.

Palabras clave: Cobertura de suelo, Monitoreo, México, MODIS

## Introducción

A nivel mundial, el estudio de la cobertura de suelo es un tópico que ha cobrado gran importancia en las últimas décadas, sobre todo gracias al uso de sensores remotos que permiten la observación y monitoreo de grandes áreas del territorio en intervalos de tiempo relativamente breves (Chuvienco 2008). El uso de la información sobre la cobertura de suelo comprende un abanico de aplicaciones muy amplio, como la actualización o corrección de cartografía existente, inventarios de recursos naturales (Feranec et al. 2010), manejo de recursos en áreas protegidas (Fraser et al. 2009) análisis de expansión urbana (Ji et al. 2001; Mundia & Aniya 2005), programas de planeación (Manonmani & Divya Suganya 2010), evaluación de emisiones de bióxido de carbono a la atmósfera (Gebhardt et al. 2014) y modelación de cambio climático (Pal et al. 2007), entre otros. En el último caso es importante considerar que la cobertura de suelo representa una de las 7 variables climáticas esenciales de acuerdo con GTOS (2009).

Existen varios proyectos en todo el mundo basados en el uso de productos de percepción remota para el mapeo y monitoreo de la cobertura de suelo tanto a nivel global (Loveland et al. 2000; Bartholomé & Belward 2005; Friedl et al. 2010) como regional (Fry et al. 2011; Pouliot et al. 2014). En este último grupo, se encuentra el Sistema de Monitoreo del Cambio en la Cobertura del Suelo de América del Norte (NALCMS, por sus siglas en inglés) (Latifovic et al. 2012), el cual es un esfuerzo regional coordinado por la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA, por sus siglas en inglés) en el que participan instituciones de los gobiernos de México, Estados Unidos y Canadá. El proyecto NALCMS tiene como generalidad, el monitoreo de cobertura de suelo con productos de resolución media derivados del espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) de la NASA y el uso de métodos de clasificación similares empleados por los países participantes.

De manera independiente, en México existen estudios que han sido desarrollados para mapear la cobertura de suelo en escala local (Berlanga-Robles & Ruiz-Luna 2002; Mas et al. 2009), pero sólo existen algunos esfuerzos a nivel nacional (Mas et al. 2004; INEGI 2009). Éstos tienen la gran desventaja de no poder generarse de manera totalmente automatizada y representan un importante esfuerzo de interpretación y edición realizada por analistas. En el caso del producto generado por NALCMS, éste se realiza con un algoritmo automatizado que disminuye el error ocasionado por la interpretación visual del ojo humano, además de que con la ayuda de computadoras es posible procesar los casi dos millones de kilómetros cuadrados del territorio mexicano en mucho menos tiempo del que le llevaría a un grupo de analistas sin el uso de técnicas automatizadas.

En el caso de México, el proyecto NALCMS generó un mapa inicial para el año 2005 mediante clasificación con árboles de decisión y utilizando la información espectral de compuestos mensuales del sensor MODIS para todo el año, además de un conjunto de datos de referencia con información de la cobertura de suelo en puntos a lo largo del país. La información del mapa de cobertura de suelo inicial fue utilizada para el proceso de actualización y mapeo de los años posteriores, en donde además se tomaron en cuenta las diferencias bianuales de los datos espectrales de cada par de años y filtros texturales (Colditz et al. 2012; Llamas & Colditz 2012)

Para lograr el ajuste del algoritmo con el que se detectaron los cambios en los periodos de 2005 a 2011, se realizó un ejercicio de actualización directa del mapa 2005 al año 2010, en este proceso, se definieron los umbrales adecuados para la identificación de cambios en las diferencias espectrales bianuales, al contrastar diferentes combinaciones de umbrales y conjuntos de datos, con una capa de cambios digitalizada manualmente.

Adicionalmente se realizó un proceso de validación en el que se evaluaron los resultados de la actualización directa del mapa 2005 a 2010. Se contrastó un grupo de píxeles distribuidos aleatoriamente en todo el país, con la asignación de la primera y la segunda clase más probable

definida visualmente por un analista en imágenes MODIS, con la misma resolución en la que se realizó la clasificación.

Finalmente, con base en la metodología para el mapeo y monitoreo de la cobertura, fue posible obtener una serie de clasificaciones de la cobertura de suelo en México. La información derivada de estas clasificaciones, permite realizar análisis sobre las tasas de cambio anuales de 2005 a 2011. También se evidenciaron patrones de cambio específicos para algunas regiones del país, en donde se observaron cambios bien definidos principalmente por efecto de la expansión urbana y cambios en los niveles de los cuerpos de agua.

## Datos

Para el proceso de clasificación de cobertura de suelo en el proyecto NALCMS se utilizaron compuestos mensuales MODIS de reflectancia en superficie desde 2005 a 2011 (Figura 1a), procesados por el Centro Canadiense de Percepción Remota (CCRS, por sus siglas en inglés), y a los cuales se les aplicó un cambio de escala para homologar la resolución de cada banda espectral a 250 m (Latifovic et al, 2012)

Se utilizaron 9 capas nacionales de información auxiliar sobre elevación, pendiente, orientación de laderas, días con altos valores de verdor, días con precipitación pluvial, precipitación pluvial total, y temperaturas medias, máximas y mínimas. Además de una capa adicional con información de la distribución espacial de las ecorregiones de México (Figura 1b). Se compilaron también 121,169 puntos de referencia con información sobre la cobertura de suelo, utilizando los registros de diferentes instituciones del sector gubernamental y académico (Figura 1c).

En el proceso de detección de cambios 2005 – 2010, se generó una capa de datos de entrenamiento con un conjunto de imágenes Landsat 5TM, en su mayoría de abril y octubre de 2005 y 2010 para compensar las diferencias fenológicas que pudieran provocar confusiones en la digitalización de cambios. Debido a la poca disponibilidad de imágenes Landsat para la porción sur de México como consecuencia del cese parcial del funcionamiento del satélite en 2005, sólo se consideraron escenas en la parte central y norte del país (Figura 1d). El conjunto de datos de entrenamiento seleccionados estuvo compuesto por 77 pares de imágenes de las 133 necesarias para cubrir la totalidad del territorio mexicano.

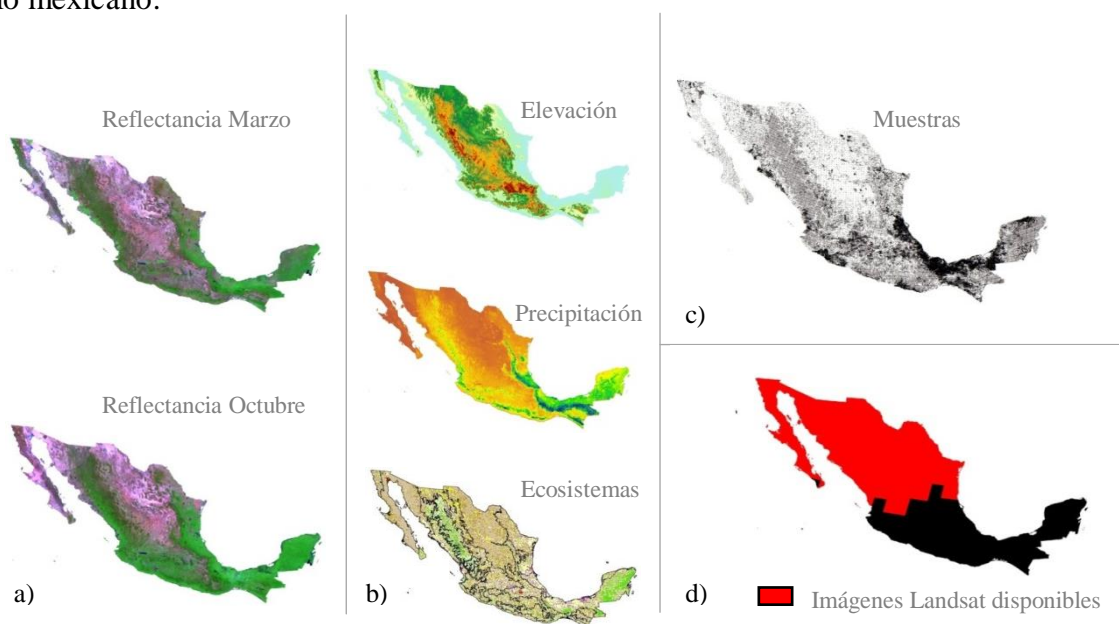


Figura 1. a) Datos de reflectancia procesados por CCRS para la clasificación de cobertura de suelo. b) Capas de información auxiliar utilizadas en la clasificación. c) Conjunto de muestras derivadas de puntos georreferenciados con información de cobertura de suelo. d) Cobertura de las imágenes Landsat utilizadas para el entrenamiento del algoritmo de detección de cambios.

## Metodología

### Generación del mapa base 2005

Utilizando los compuestos mensuales derivados de las imágenes MODIS de 2005, se produjo una serie de tiempo anual considerando las 7 bandas del sensor, además de generar una capa de NDVI para cada mes. Se utilizaron los 121,169 puntos de muestreo integrados en una cuadrícula con 250 m de resolución para la aplicación del algoritmo de árboles de decisión, se utilizó el 80% de los puntos como datos de entrenamiento y el 20% restante como datos de validación.

Mediante el algoritmo C5.0 (Quinlan 1993), se generaron árboles de decisión utilizando diferentes combinaciones de datos y muestras, considerando también las capas de datos auxiliares mencionadas en la sección anterior. Los resultados de la aplicación de los distintos árboles de decisión fueron combinados, conservando en todos los píxeles la proporción de cada clase de cobertura de suelo. Posteriormente, se obtuvo una serie de mapas con clasificaciones discretas, de las cuales se tomó la clase más probable como valor para la representación en el mapa de cobertura final.

Una vez obtenido el mapa de cobertura de suelo, se realizaron ajustes post-clasificatorios para corregir la extensión de las áreas urbanas que fueron sobreestimadas en algunas zonas del norte de México, debido principalmente al bajo contraste entre el área urbana y la cobertura circundante en zonas áridas. Se ajustaron también las áreas en los cuerpos de agua y zonas de hielo y nieve, utilizando máscaras preestablecidas que consideran su extensión máxima.

### Detección de cambios 2005 – 2010

Para el proceso de actualización de la cartografía de cobertura de suelo del año 2005 hacia los años posteriores, en un primer ejercicio, se realizó la detección de cambios entre 2005 y 2010 con la intención de calibrar el algoritmo que sería aplicado a los periodos bianuales entre 2005 y 2011. De acuerdo con estudios realizados previamente (Xian et al. 2009; Pouliot et al. 2014), la actualización de cartografía de cobertura de suelo mediante la detección de zonas de cambio potencial y la aplicación de métodos de clasificación sólo en esas áreas, representa la ventaja de no modificar el mapa base en regiones que no fueron identificadas como cambio potencial en el paso inicial.

Para México, la identificación de áreas de cambio potencial se realizó calculando diferencias bianuales entre los datos espectrales normalizados, derivados de las siete bandas de las imágenes MODIS. Se generaron además capas de información adicional como NDVI, y de éstas se derivaron los filtros de Sobel y Laplace para la detección de bordes. El conjunto de estos datos, compuesto por 120 capas para cada año, fue utilizado para el cálculo de las diferencias. Contrastando los resultados de distintas combinaciones de umbrales de diferencia, con la capa de datos de entrenamiento generada con las imágenes Landsat 5TM, se observó que los mejores resultados para la identificación de cambios potenciales, se obtenían tomando en cuenta los cuantiles de 1% y 99%. Como parámetro adicional, se consideró la frecuencia, estableciendo que un píxel debía ser marcado al menos 30 veces (25%) entre los cuantiles de 1% y 99% en el conjunto de las 120 diferencias para ser considerado como cambio potencial (Figura 2).

Una vez realizado el proceso de detección de cambios, los resultados obtenidos fueron editados manualmente para omitir polígonos de cambio en áreas donde se conoce a priori que las diferencias extremas no son causadas principalmente por cambios en la cobertura de suelo. En la edición se realizó la remoción de polígonos en zonas desérticas donde los cambios identificados están relacionados con diferencias en la humedad del suelo, en zonas de agricultura de riego donde las diferencias son provocadas por cambios en la fenología de los cultivos, y áreas de inundación recurrente durante una temporada conocida cada año.

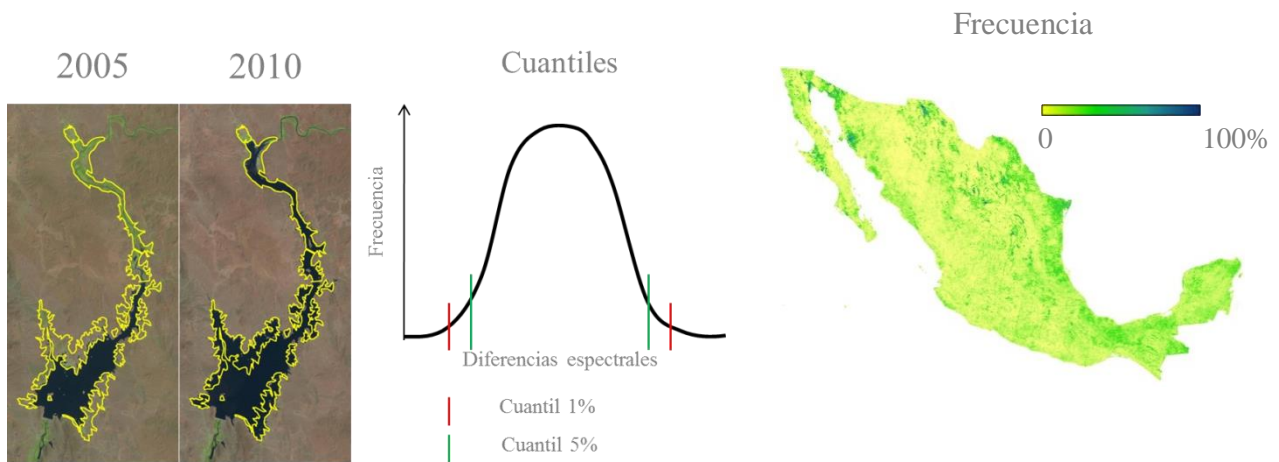


Figura 2. Búsqueda de umbrales óptimos para

la detección de cambio, contrastando los resultados de diferentes combinaciones de cuantiles en el conjunto de diferencias bianuales, con los cambios digitalizados sobre imágenes Landsat5 TM. Los umbrales óptimos corresponden a los cuantiles 1% y 99%.

### Generación de mapas anuales de cobertura de suelo 2005 – 2011

Una vez determinados los parámetros óptimos para la aplicación del algoritmo de detección de cambios, se aplicó un proceso de actualización iterativa. De esta manera, se detectaron inicialmente cambios potenciales entre 2005 y 2006. Después se realizó un proceso de clasificación sólo en los polígonos identificados como cambio, tomando información de los píxeles circundantes como datos de entrada para la aplicación de árboles de decisión; de manera similar a lo realizado en la clasificación del mapa base. Aun cuando todos los píxeles dentro de los polígonos de cambio identificados inicialmente fueron considerados en el proceso de clasificación, no todos fueron asignados a una clase distinta en el mapa final. Una vez obtenidos los resultados de la clasificación, se tomó como referencia una matriz de lógica para definir cambios permitidos y no permitidos (Figura 3), de esta manera se limitaron nuevas asignaciones sólo a transiciones que resultaran congruentes. Las áreas que fueron clasificadas como un nuevo tipo de cobertura se reportaron como cambio real, obteniéndose así los valores de cambio para cada clase entre el mapa inicial (2005) y el mapa final (2006).

Este proceso se realizó de manera iterativa para los pares de años posteriores, tomando como año inicial el mapa clasificado con anterioridad. De esta manera para la realización de mapa de 2007 se tomó como base el mapa de 2006, proceso que se aplicó a los años subsecuentes hasta obtener el mapa de cobertura 2011 a partir de la actualización del año 2010.

Año inicial		Año final																
		Clase	Nombre	1	2	4	5	6	7	8	9	10	14	15	16	17	18	19
	1	Bosque de coníferas templado o subpolar	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	Bosque de latifoliadas perennifolio tropical o subtropical	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0
	4	Bosque de latifoliadas caducifolio tropical o subtropical	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
	5	Bosque de latifoliadas caducifolio templado o subpolar	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	6	Bosque mixto	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	7	Matorral tropical o subtropical	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0
	8	Matorral templado o subpolar	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	9	Pastizal tropical o subtropical	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0
	10	Pastizal templado o subpolar	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	14	Humedal	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	15	Suelo agrícola	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	16	Suelo desnudo	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	17	Asentamiento humano	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	18	Cuerpo de agua	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	19	Nieve y hielo	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1

0 Cambio no permitido    
 1 Asignación de la misma clase    
 1 Cambio permitido

Figura 3. Matriz de lógica para definir cambios permitidos en actualizaciones de clase de cobertura de suelo.

## Resultados

La serie de mapas de cobertura de suelo del proyecto NALCMS para México se presentan con un área mínima cartografiable de 25ha (4 píxeles MODIS conectados por la regla de 8 vecinos). La leyenda de los productos finales está compuesta por 19 clases homologadas para México y Estados Unidos y Canadá, aunque en México sólo existen 15 de éstas (Figura 3).

Antes de realizar las clasificaciones anuales, la exactitud del mapa base fue evaluada por un analista en un conjunto de píxeles distribuidos por todo el país. El analista asignó la primera y segunda clase más probable mediante interpretación visual en la misma resolución que el algoritmo realizó la clasificación (250 m). Esta validación arrojó una exactitud de 74% considerando sólo la clase más probable, y 83% al considerar las dos probabilidades de asignación (Colditz et al. 2012).

En el mapa del año 2010 que se muestra en este trabajo como referencia (Figura 4), se observa que la mayor extensión es ocupada por las clases de matorrales con 37.3 % del territorio, mientras que la clase de suelo agrícola ocupa el 20.2 %. Por otro lado, todas las clases de bosque agrupadas cubren 21.5% del país, y los dos tipos de pastizales presentes ocupan el 9.2 % del territorio.



Figura 4. Mapa de cobertura de suelo 2010 generado en el marco del proyecto NALCMS.

Los cambios reales reportados en los 6 periodos bianuales, son alrededor de 4 veces menores al el cambio potencial detectado como se observa en la figura 5. Los periodos con mayor área de cambio fueron 2008-2009 (0.11 %) y 2009-2010 (0.1 %) respectivamente, mientras que el periodo bianual con menos cambio fue 2005-2006 (0.08 %).

En el análisis de la serie de mapas de cobertura de suelo 2005-2011 se observó que existen algunos patrones definidos de cambio, principalmente en la transición de diferentes tipos de cobertura a suelo urbano. Los principales ejemplos de estos cambios fueron identificados en la expansión de



ciudades localizadas en la península de Yucatán, como Mérida y Cancún (Figura 6), además de zonas urbanas donde predomina el crecimiento horizontal como Monterrey en el noreste del país y Tijuana en la frontera noroeste.

En el caso de los cuerpos de agua, se observó también un patrón de fluctuaciones que está determinado por los regímenes de precipitación anuales y por la presencia de fenómenos meteorológicos que generan aportes importantes en los flujos de corrientes superficiales e incrementan el nivel en los depósitos naturales y artificiales.

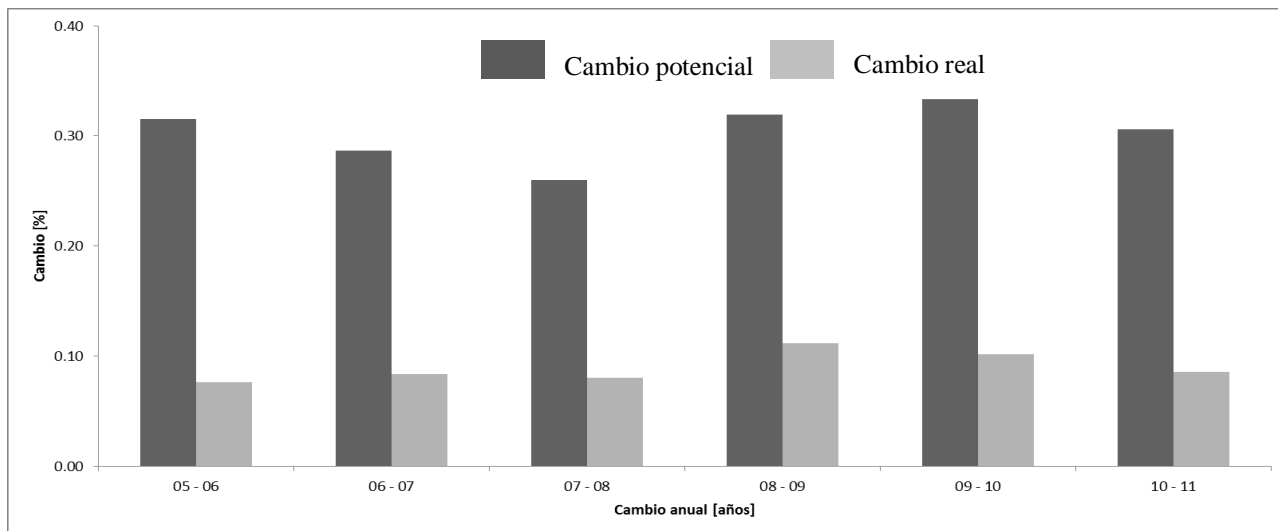


Figura 5. Porcentaje de cambio anual registrado en la serie de mapas de cobertura de suelo 2005 -2011.

También se identificaron casos donde el cambio de cobertura de suelo fue provocado por la remoción de la cubierta original para dar paso al desarrollo de proyectos mineros, principalmente en el norte de México, donde las clases correspondientes a bosque mixto y bosque de coníferas templado, fueron clasificadas de manera gradual hacia clases de pastizal templado y suelo desnudo. Los principales ejemplos de este tipo de cambio están representados por los complejos mineros de Pinos Altos, Ocampo y Crestón Mascota en el estado de Chihuahua, además de la mina Peñasquito en San Luis Potosí, donde 1,330 ha de matorral subtropical cambiaron a suelo desnudo entre 2005 y 2010.

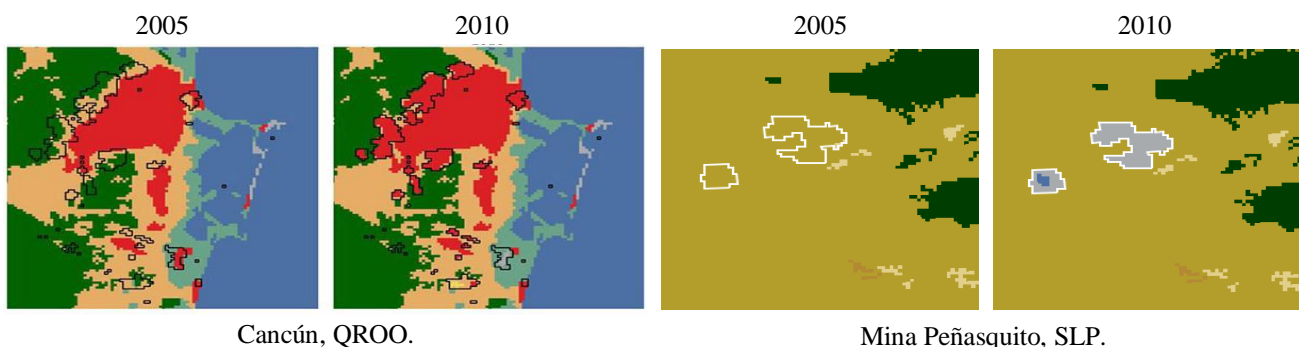


Figura 6. Cambios identificados en la zona urbana de Cancún, Quintana Roo y en la Mina de Peñasquito en San Luis Potosí, las imágenes hacen referencia a la transición en la cobertura de suelo entre 2005 y 2010.

## Conclusiones

En este trabajo, se describe el panorama general del Sistema de Monitoreo de la Cobertura de Suelo de América del Norte, desde la clasificación inicial del mapa base para el año 2005, hasta la generación de los productos anuales que concluyen con el año 2011.

Basado en los valores generales de exactitud presentados para el mapa de cobertura de México (74%), se puede concluir que la congruencia entre los insumos anuales, derivados del mismo sensor y con métodos de preprocesamiento similares, representa una gran ventaja en la aplicación de técnicas automatizadas para la clasificación de cobertura de suelo.

La calibración previa del algoritmo de detección de cambios potenciales utilizando datos de los años 2005 y 2010, permitió encontrar los umbrales adecuados en el análisis de las diferencias extremas que se deben utilizar para la identificación de cambios reales, omitiendo en lo más posible la detección de diferencias espectrales no relacionadas con cambios de cobertura. La serie de mapas generada permitió identificar patrones de cambio recurrente en zonas específicas del país, especialmente en áreas urbanas, niveles en cuerpos de agua y desarrollos mineros.

Los productos del proyecto NALCMS están disponibles a todo el público a través de la Comisión para la Cooperación Ambiental, así como de la comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad, México. Esto hace que los mapas de cobertura adquieran mayor relevancia, ya que están a disposición de cualquier usuario para su utilización en proyectos de investigación y análisis de la metodología expuesta en el trabajo.

### **Acceso a los datos**

Para obtener los productos a nivel subcontinental, a través del atlas ambiental de América del Norte en la sección de ecosistemas y cobertura de suelo.

<http://cec.org/Page.asp?PageID=1226&SiteNodeID=498>

La cartografía para de cobertura de suelo para México puede ser obtenida del geoportal de la Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad, México.

[http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/usv/otras/nalcmsmx05gw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/otras/nalcmsmx05gw)

Los cambios entre 2005 y 2010, así como la diversidad de la cobertura de suelo en México, pueden ser consultados en dos mapas interactivos.

[http://speck.conabio.gob.mx/NALCMS/2005\\_2010/es/index.html](http://speck.conabio.gob.mx/NALCMS/2005_2010/es/index.html)

<http://speck.conabio.gob.mx/NALCMS/photos/es/index.html>

Para obtener mayor información sobre el proceso de clasificación de cobertura de suelo y detección de cambios en México dentro de marco del proyecto NALCMS.

[http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/cobertura\\_suelo/br/nalcms/index.html](http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/cobertura_suelo/br/nalcms/index.html)

### **Bibliografía**

Bartholomé, E. & Belward, A.S., 2005. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(9), pp.1959–1977.

Berlanga-Robles, C.A. & Ruiz-Luna, A., 2002. Land Use Mapping and Change Detection in the Coastal Zone of Northwest Mexico Using Remote Sensing Techniques. *Journal of Coastal Research*, 18(3), pp.514–522.

Chuvieco, E., 2008. *Teledetección Ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*, Barcelona, España: Ariel.



- Colditz, R., Llamas, R. & Ressler, R., 2012. Estimating land cover changes in Mexico between 2005 and 2010 using 250m MODIS images. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
- Colditz, R.R. et al., 2012. Generation and analysis of the 2005 land cover map for Mexico using 250m MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 123, pp.541–552.
- Feranec, J., Jaffraini, G. & Hazeu, G., 2010. Determining changes and flows in European landscapes 1990–2000 using CORINE landcover data. *Applied Geography*, 30, pp.19–35.
- Fraser, R.H., Olthof, I. & Pouliot, D., 2009. Monitoring land cover change and ecological integrity in Canada's national parks. *Remote Sensing of Environment*, 113(7), pp.1397–1409.
- Friedl, M.A. et al., 2010. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), pp.168–182.
- Fry, J.A. et al., 2011. National Land Cover Database for the Conterminous United States. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 77(9).
- Gebhardt, S. et al., 2014. MAD-MEX: Automatic Wall-to-Wall Land Cover Monitoring for the Mexican REDD-MRV Program Using All Landsat Data. *Remote Sensing*, 6(5), pp.3923–3943.
- GTOS, 2009. *Assessment of the status of the development of the standards for the terrestrial essential climate variables – ECV-T9: Land cover. GTOS-64*.
- INEGI, 2009. *Guía para la interpretación de cartografía, uso de suelo y vegetación Escala 1:250 000 Serie III*, Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- Ji, C.Y. et al., 2001. Monitoring urban expansion with remote sensing in China. *International Journal of Remote Sensing*, 22(8), pp.1441–1455.
- Latifovic, R. et al., 2012. North American land-change monitoring system. In C. P. Giri, ed. *Remote Sensing of Land Use and Land Cover: Principles and Applications*. Boca Raton, FL.: CRC/Taylor & Francis, pp. 303–324.
- Llamas, R.M. & Colditz, R.R., 2012. Characterization and distribution of the land cover change in Mexico between 2005 and 2010 based on automated detection with 250m MODIS images. *Revista SELPER*, 34(2), pp.5–12.
- Loveland, T.R. et al., 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP Discover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6), pp.1303–1330.
- Manonmani, R. & Divya Suganya, G.M., 2010. Remote Sensing and GIS Application In Change Detection Study In Urban Zone Using Multi Temporal Satellite. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 1(1), pp.60–65.
- Mas, J.-F. et al., 2004. Assessing land use/cover changes: a nationwide multidecade spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), pp.249–261.

- Mas, J.-F., Velázquez, A. & Couturier, S., 2009. La evaluación de los cambios de cobertura / uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental*, 1(1), pp.23–39.
- Mundia, C.N. & Aniya, M., 2005. Analysis of land use/cover changes and urban expansion of Nairobi city using remote sensing and GIS. *International Journal of Remote Sensing*, 26(13), pp.2831–2849.
- Pal, J.S. et al., 2007. Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9), pp.1395–1409.
- Pouliot, D. et al., 2014. Development and assessment of a 250m spatial resolution MODIS annual land cover time series (2000–2011) for the forest region of Canada derived from change-based updating. *Remote Sensing of Environment*, 140, pp.731–743.
- Quinlan, J.R., 1993. *C4.5: Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann.
- Xian, G., Homer, C. & Fry, J., 2009. Updating the 2001 National Land Cover Database land cover classification to 2006 by using Landsat imagery change detection methods. *Remote Sensing of Environment*, 113(6), pp.1133–1147.