

CUANTIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN BIOFÍSICA DE LOS AMBIENTES URBANOS DE LA CIUDAD DE MÉRIDA, YUCATÁN BASADA EN EL ANÁLISIS DE IMÁGENES LANDSAT TM/ETM+/OLI (1986-2014)

Hannali SANDOVAL^a, Juan Manuel NÚÑEZ^{*b}

^aUNAM, Av. Universidad 3000, Coyoacán DF, México

^{*b}CentroGeo, Contoy 137, Tlalpan DF, México

email: *email: jnunez@centrogeo.edu.mx

RESUMEN

Cuantificar los cambios en la superficie impermeable, es importante en el monitoreo de los ambientes urbanos y en el entendimiento de las actividades humanas. Se trata de una de las principales características de la composición urbana que resultan esenciales para la estimación de factores socio-económicos y ambientales, tales como la densidad de construcción y las emisiones de gases de efecto invernadero. En este trabajo, una aproximación metodológica para evaluar el cambio en la superficie impermeable es presentada a través del análisis de imágenes Landsat TM/ETM+/OLI para la Zona Metropolitana de Mérida en Yucatán, México. Estimaciones de superficie impermeable fueron generadas a partir de la segmentación de bajo y alto albedo de la composición biofísica cuantificada para los años 1986, 2000 y 2014. La precisión de la estimación fue evaluada por el acuerdo entre la superficie impermeable estimada y el método de clasificación supervisada (máxima verosimilitud). La mejor eficiencia fue de Landsat ETM+ seguido de Landsat OLI, mientras que Landsat TM muestra un resultado pobre.

Palabras clave: Composición biofísica, superficie impermeable, Landsat

ABSTRACT

Quantify the changes of impervious surface is important in monitoring urban environments and understanding human activities. This is one of the main features of the urban composition that are essential for the estimation of socio-economic and environmental factors, such as built-up density and emissions of greenhouse gases. In this paper, a methodological approach to evaluate change in impervious surface is presented through the analysis of imagery of Landsat TM / ETM + / OLI for the Metropolitan Zone of Merida Yucatan, Mexico. Impervious surface estimates were generated from the segmentation of low and high albedo of the biophysical composition quantified for the years 1986, 2000 and 2014. The estimation accuracy was evaluated by the agreement between the estimated impervious surface and the method of supervised classification (Maximum Likelihood). The best efficiency was to Landsat ETM+ followed by Landsat OLI, whereas that Landsat TM shows a poor result.

Keywords: Biophysical composition, impervious surface, Landsat

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la ONU, durante la segunda mitad del siglo XX la población urbana en el mundo casi se cuadruplicó, al pasar de 732 millones en 1950 a

2 800 millones en 2000. Mientras que para 2008, la población mundial cruzó el umbral hacia los ambientes urbanos y más de la mitad de la población vive ya en áreas urbanas (Lee, 2007). La

urbanización es considerada una de las fuerzas antropogénicas más poderosas y visibles sobre el planeta, cuya influencia sobre el medio ambiente y la biodiversidad se manifiesta a escalas local, regional y global. De hecho, las áreas urbanas densamente pobladas representan uno de los ambientes terrestres más alterados, debido a la forma y velocidad con las que se da el proceso de transformación de la cubierta terrestre

La superficie impermeable (SI) se define esencialmente como todas aquellas superficies o estructuras artificiales –vialidades, aceras, edificios, y estacionamientos entre otros– cuyo material impide la infiltración del agua y, por tanto, evita muchos de los servicios ecosistémicos asociados con el suelo: producción de alimentos; hábitat para las plantas; regulación del micro-clima, etc. (Scott *et al.*, 2014)

Estimar la cantidad, magnitud, localización, geometría y morfología de las superficies impermeables en los distintos niveles de paisaje (local, regional y global) es de gran importancia en el contexto de monitoreo de cambio climático por su contribución a la degradación del medio ambiente (Weng, 2012; Arnold&Gibbons, 1996); además de ser uno de los principales indicadores de las implicaciones del desarrollo urbano (Yang *et al.*, 2014).

Este trabajo propone la aplicación de una aproximación metodológica para evaluar el cambio de la superficie impermeable mediante la cuantificación de la composición biofísica de los ambientes urbanos. El enfoque original basado en el análisis de imágenes Landsat TM/ETM+/OLI, permite identificar patrones espectrales en las imágenes asociados con la superficie impermeable.

El documento se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 introduce los fundamentos teóricos de la propuesta; a continuación, la Sección 3 presenta el área de estudio, los conjuntos de datos empelados y su procesamiento; los resultados mostrados en la Sección 4 incluyen los cambios en la superficie urbana entre 1986 y 2014 para la Zona Metropolitana de Mérida, además de los resultados de la evaluación de precisión;

finalmente algunas conclusiones acerca de la propuesta se presentan en la Sección 5.

2. ANTECEDENTES

El *BiophysicalCompositionIndex* (BCI) es un indicador cuantitativo diseñado para la caracterización de la composición biofísica de los entornos urbanos, basado en el modelo triangular de Ridd (1995) que relaciona los datos de la cobertura terrestre obtenidos con percepción remota con los aspectos biofísicos de los entornos urbanos (Deng&Wu, 2012). Bajo este índice la estructura urbana queda definida como una combinación de las coberturas de vegetación, suelos desnudos y superficies impermeables. Espectralmente el BCI puede separar mejor las superficies impermeables de los suelos desnudos y tiene una mejor correlación con la vegetación y las superficies impermeables, en comparación con otros índices, incluyendo el *NormalizedDifferenceVegetationIndex* (NDVI), *NormalizedDifferenceBuilt-Up Index* (NDBI) y *NormalizedDifferenceImperviousSurfaceIndex* (NDISI) (Deng&Wu, 2013).

El BCI se deriva a partir de una reinterpretación de la transformación *TasseledCap* (TC) (Kauth&Thomas, 1976); esta transformación pretende poner en evidencia el comportamiento espectral de la vegetación y el suelo, al crear nuevos ejes ajustados al espacio físico, que son: brillo, verdor y humedad.

A continuación se muestran las ecuaciones para generar el BCI:

$$BCI = \frac{(H + L)/2 - V}{(H + L)/2 + V}$$

$$H = \frac{TC1 - TC1_{min}}{TC1_{max} - TC1_{min}}$$

$$V = \frac{TC2 - TC2_{min}}{TC2_{max} - TC2_{min}}$$

$$L = \frac{TC3 - TC3_{min}}{TC3_{max} - TC3_{min}}$$

Donde H es “high albedo material”, L es “low albedo material”, y V es “vegetation”; TC_i ($i = 1,2,3$) son los tres componentes de TC; TC_i min y TC_i max son los valores mínimos y máximos de los respectivos componentes de TC. La transformación *TasseledCap*, se ha propuesto para todos los sensores de la serie Landsat incluidos TM, ETM+ y OLI (Baiget *et al.*, 2014).

3. MATERIALES Y MÉTODO

3.1 ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

El área de estudio es la Zona Metropolitana de Mérida (ZMM), localizada en el noroeste de la península de Yucatán, México. La ZMM está conformada por los municipios de Mérida, Umán, Kanasin, Conkal y Ucú (Figura 1).

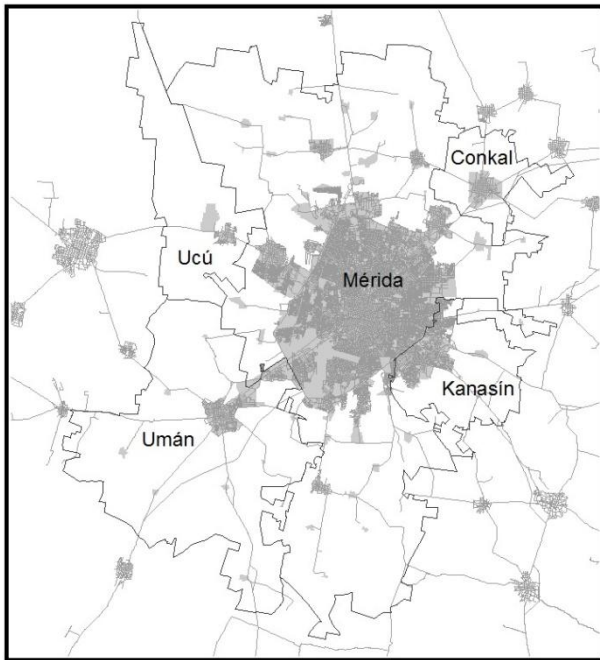


Figura 1: Área de estudio, Zona Metropolitana de Mérida.

Mérida es una ciudad reconocida por su patrimonio cultural y por ser una de las ciudades más seguras del país, es el centro más dinámico de la península de Yucatán, generado por altos ritmos de crecimiento poblacional y concentración, el cual se ha acelerado en las últimas décadas, estructurando la actual configuración urbana del territorio.

Datos: Se emplean imágenes multispectrales de los diferentes sensores de Landsat con resolución espacial de 30 m (Tabla 1).

Tabla 2: Datos de las imágenes Landsat adquiridas para la cuantificación de la composición biofísica. A partir de los 3 pares de imágenes por sensor, se crearon 3 mosaicos para los años 1986, 2000 y 2014 para el área de estudio.

Sensor	Path	Row	Fecha
Landsat-5 TM	20	45	13/03/1986
Landsat-5 TM	20	46	13/03/1986
Landsat-7 ETM+	20	45	6/11/2000
Landsat-7 ETM+	20	46	6/11/2000
Landsat-8 OLI	20	45	5/01/2014
Landsat-8 OLI	20	46	5/01/2014

En cuanto al procesamiento de las imágenes multispectrales empleadas, se ocupó el método FLAASH incluido en el software ENVI 5.1, basado en el código de transferencia de radiación MODTRAN, que es una herramienta de modelado de corrección atmosférica para recuperar la reflectancia espectral desde la radiancia, donde se especificaron los siguientes parámetros para las imágenes: atmósfera tropical, modelo de aerosol rural y el método de recuperación de aerosol de 2 bandas. La corrección atmosférica es necesaria para una buena estimación de las variables biofísicas como es la transformación *TasseledCap* y el BCI.

3.2 METODOLOGIA

Una vez obtenidas las superficies de reflectancia corregidas atmosféricamente, el procedimiento propuesto es el siguiente:

- a) **Cuantificación de la Composición Biofísica.** Consiste en la estimación y normalización de los componentes TC a partir de las imágenes corregidas atmosféricamente, para posteriormente

calcular el BCI de acuerdo con las ecuaciones de la Sección 2.

- b) **Determinación de la superficie impermeable.** Es generada mediante el método tradicional de segmentación del BCI, aplicando el valor umbral desarrollado por Deng&Wu (2013), que separa las cubiertas de bajo y alto albedo a partir de valores mayores a -0.04.
- c) **Evaluación de la precisión.** Consiste en la comparación entre las superficies impermeables generadas a partir del valor umbral y una clasificación supervisada que es generada por métodos de aprendizaje automático. Una evaluación de este tipo, se basa en una comparación de la extensión de las superficies impermeables derivadas del método en relación con la extensión real de dichas superficies (Richards, 1996).

4. RESULTADOS

4.1 MAPEO Y CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE IMPERMEABLE

De acuerdo con la metodología propuesta, las extensiones de la superficie impermeable estimadas para la ZMM son de 6 791 ha para 1986; 15 868 ha para 2000; y 21 593 ha para 2014 (Figura 2). Lo anterior significa que el crecimiento urbano durante el primer periodo analizado 1986-2000 representa el 61% del total de la expansión de la superficie urbana de la zona de estudio. Mientras que para todo el periodo, la tasa de crecimiento de la superficie impermeable fue de 529 ha/año.

De la misma manera, el valor del BCI cuantificado para las superficies impermeables estimadas presenta una tasa mayor de cambio para el primer periodo de crecimiento, al pasar de 0.08349 en 1986 a 0.09508 en 2000; mientras que el valor promedio del BCI para la superficie impermeable estimada en 2014 es de 0.09737, lo que significa apenas un pequeño incremento en la composición biofísica de los ambientes urbanos de la ciudad.

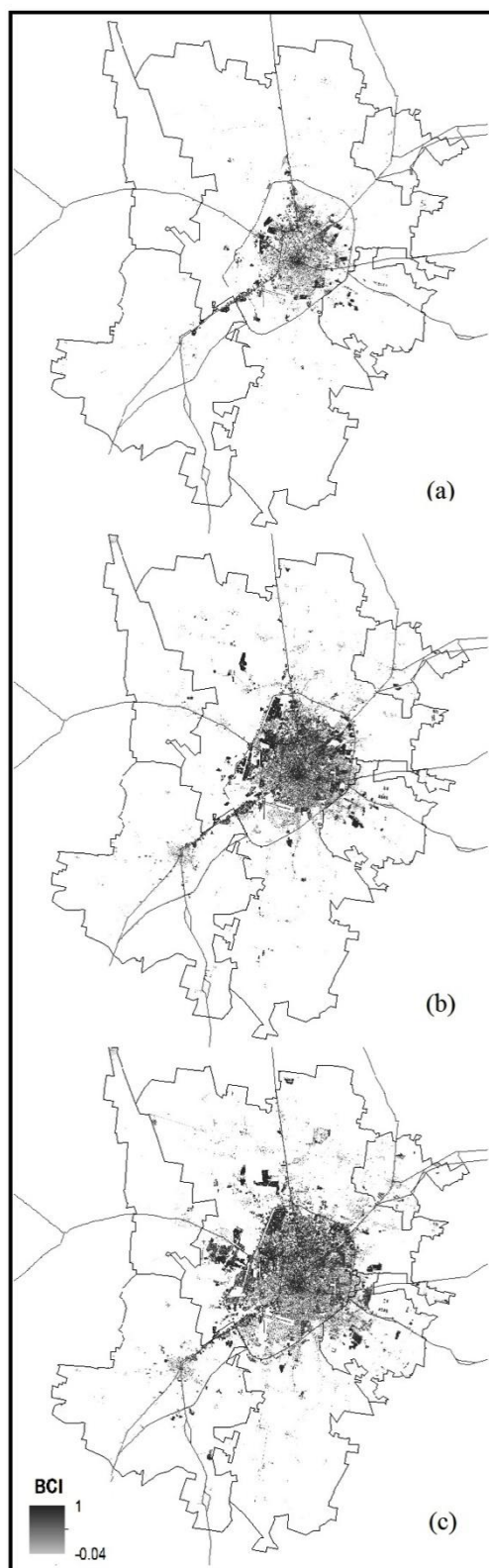


Figura 2: Derivación de superficie impermeable

Dentro de las superficies impermeables de la ZMM, se pueden encontrar diferentes tipos de comportamiento urbano, según su densidad, diversidad, diseño, destino y distancia, estos parámetros pueden dividir a la ciudad en 3 categorías de acuerdo con un estudio del Centro Mario Molina que utilizó la metodología Caras de Chernoff (Huff et al., 1981) para identificar grupos de características similares asociados a colonias: Central, intraurbano y periurbano. A partir de la selección de lugares tipo, se obtuvieron las estadísticas del BCI con el objetivo de conocer su comportamiento a través de los años (Figura 3).

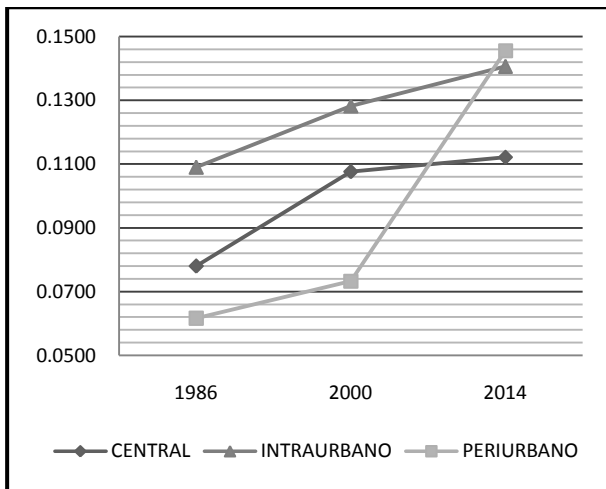


Figura 3: Valores promedio de BCI para las colonias clasificadas como lugares tipo en las fechas analizadas.

Como se observa en la Figura, durante el primer periodo de estudio, las categorías central e intraurbano muestran la mayor tasa de consolidación de la superficie urbana respectivamente; mientras que para el segundo periodo de análisis es la categoría periurbano la que muestra una mayor tasa de consolidación, lo que incluso muestra que para 2014 tanto las colonias intraurbanas como periurbanas muestran una composición urbana similar

4.2 EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DEL MAPEO DE LA SUPERFICIE IMPERMEABLE.

Con el fin de evaluar la precisión, se propuso una estrategia que combina las formas tradicionales de elaboración de matrices de confusión y cálculo del

coeficiente de concordancia kappa (Congalton, 1991) con la evaluación del acuerdo (Petropoulos et al., 2012), aplicada a las superficies impermeables (SI) estimadas a partir de la metodología propuesta y el resultado de una clasificación supervisada (CS) mediante el método de máxima verosimilitud realizado a partir del set de imágenes Landsat empleadas en este trabajo.

Para el caso de las imágenes Landsat ETM+ y OLI, se emplearon las imágenes pancromáticas para la selección de 1000 puntos al azar correspondientes con las clases superficie impermeable y otros; mientras que para la imagen Landsat TM se emplearon composiciones a color de los datos originales para su mejor interpretación. En todos los casos la interpretación se auxilio de los resultados de superficies urbanas para 1980, 2000 y 2014 reportados por Iracheta (2014). Los resultados obtenidos indican valores de confiabilidad global para las SI de 86.0%, 90.1% y 86.1%; mientras que para el caso de las CS los valores de confiabilidad global alcanzados fueron de 74.6%, 87.2% y 87.6% para Landsat TM, ETM+ y OLI respectivamente en ambos casos. Con respecto del coeficiente kappa los valores para las SI fueron de 0.7200, 0.8020 y 0.7220 con una varianza de 0.0015; mientras que para las CS los valores fueron de 0.4920, 0.7440 y 0.7520 con una varianza de 0.0146.

Para la evaluación del acuerdo se derivaron tres parámetros: Eficiencia de área detectada (DAE), error de comisión (FAR), y error de omisión (SAR). (Scott et al., 2014).

$$DAE = \frac{DIA}{DIA + SIA}$$

$$FAR = \frac{FIA}{DIA + FIA}$$

$$SAR = \frac{SIA}{DIA + SIA}$$

Donde DIA es el área impermeable común entre la SI y la CS, SIA es el área impermeable incluida en CS, pero no en la SI, y FIA es el área impermeable generada por la SI, pero no por la CS. Los datos obtenidos se muestran a continuación (Tabla 3).

Tabla 3. DAE, FAR y SAR en valores porcentuales, para las tres fechas de Landsat.

	1986	2000	2014
DAE	50.7%	82.2%	78.8%
FAR	0.0%	0.0%	0.0%
SAR	49.3%	17.8%	21.2%

Como se observa en la tabla la mayor eficiencia se obtienen para Landsat 7 con un DAE de 82.2%. Este resultado coincide con la mayor confiabilidad calculada para ambas estrategias y con el hecho de ser Landsat ETM+ el sensor sobre el cual se propuso el valor del umbral empleado en este trabajo para llevar a cabo la segmentación. Para FAR (error de comisión), se observa que las superficies impermeables estimadas, para las 3 fechas, no ocupan mayor superficie que la de la clasificación supervisada.

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se observa que durante el periodo de análisis 1986-2000, el aumento en la extensión de la ciudad está asociado a un mayor incremento en el valor de la composición biofísica de las colonias tipificadas como centrales e intraurbanas; mientras que, para el periodo 2000-2014, el aumento en la extensión está asociado a las colonias periurbanas, logrando éstas alcanzar valores similares a los de las colonias tipificadas como intraurbanas.

Los resultados obtenidos de las superficies impermeables para la zona metropolitana de Mérida, ofrecen un panorama de cómo esta Ciudad ha ido transformando a lo largo del tiempo su composición biofísica.

6. REFERENCIAS

- Arnold Jr, C. L., & Gibbons, C. J. (1996). Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American planning Association*, 62(2), 243-258.
- Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., & Tong, Q. (2014). Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 5(5), 423-431.
- Congalton, R. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37:35-46.
- Deng, C., & Wu, C. (2012). BCI: A biophysical composition index for remote sensing of urban environments. *Remote Sensing of Environment*, 127, 247-259.
- Deng, C., & Wu, C. (2013). A spatially adaptive spectral mixture analysis for mapping subpixel urban impervious surface distribution. *Remote Sensing of Environment*, 133, 62-70.
- Huff, D. L., Mahajan, V., & Black, W. C. (1981). Facial representation of multivariate data. *The Journal of Marketing*, 53-59.
- Iracheta, A. (2015). Ciudad compacta-ciudad difusa: Nota para el debate. En *Ciudad Compacta*, del concepto a la práctica (Ed. Quiroz, H.). Universidad Nacional Autónoma de México. p. 233-266 (en prensa)
- Kauth, R. J., & Thomas, G. S. (1976). The Tasseled Cap — A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data* (pp. 41-51).
- Lee, K., (2007). An urbanizing world. In: O'Meara, S.M. et al. *State of the World. Our urban future*. New York, The World Watch Institute/W.W.Norton & Company.
- Petropoulos, G.P., Kontoes, C.C., & Keramitsoglou, I. (2012). Land cover mapping with emphasis to burnt area delineation using co-orbital ALI and Landsat TM imagery. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 18, 344-355.
- Richards, J. A. (1996). Classifier performance and map accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 57, 161-166.
- Ridd, M. (1995). Exploring a V-I-S (vegetation-impervious-surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 2165-2185.
- Scott, D., Petropoulos, G. P., Moxley, J., & Malcolm, H. (2014). Quantifying the physical composition of urban morphology throughout Wales based on the time series (1989-2011) analysis of Landsat TM/ETM+ images and supporting GIS data. *Remote Sensing*, 6(12), 11731-11752.
- Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34-49.
- Yang, F., Matsushita, B., Yang, W., & Fukushima, T. (2014). Mapping the human footprint from satellite

measurements in Japan. ISPRS journal of
photogrammetry and remote sensing, 88, 80-90.