CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA DETERMINACIÓN DE ÁREAS Y VOLÚMENES DE CORTEZA VEGETAL

Román Edén Parra Galaviz

Dr. en Ciencias en Desarrollo Sustentable de Recursos Naturales, Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), México. Correo electrónico: roman.parra@uas.edu.mx. <https://orcid.org/0000-0003-2679-8594>.

Manuel de Jesús Pérez Valdez

Dr. en Ciencias Técnicas “Fotogrametría”, Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS). Correo electrónico: manuel.perez@uas.edu.mx. <https://orcid.org/0000-0003-4919-489X>.

Jesús Ramón Rodríguez Apodaca

Dr. en Ciencias, Universidad Autónoma Indígena de México (UAIM), , correo electrónico: jramon@uaim.edu.mx. <https://orcid.org/0000-0002-3609-1958>.

Hugo Humberto Piña Ruiz

Dr. en Ciencias en Ecología y Manejo de Recursos Naturales, Universidad Autónoma Indígena de México (UAIM). correo electrónico: hugo_uaim@hotmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5457-2341>.

Claudia Selene Castro Estrada

Dra. en Ciencias en Desarrollo Sustentable de Recursos Naturales, Universidad Autónoma Indígena de México (UAIM). Correo electrónico: draclaudiacastro@uais.edu.mx. <https://orcid.org/0000-0003-4461-9633>.

Resumen

La vegetación representa una de las variables de mayor interés en la mitigación de los efectos del cambio climático, por tal motivo, su análisis debe ser considerado por diferentes especialistas desde un punto de vista investigativo que aporte a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El presente estudio tiene como finalidad establecer nuevas alternativas de muestreo de corteza vegetal para su ubicación, cuantificación y distribución sobre la superficie terrestre, empleando para ello una combinación de técnicas tales como: fotogrametría digital, sistemas de información geográfica (SIG) y análisis multitemporales. La metodología empleada es de tipo experimental con enfoque

www.doi.org/10.47212/tendencias2020vol.xiii.5

cuantitativo, basada en la utilización de datos fotogramétricos, llevados a un proceso de validación rigurosa, en función de dos variables; áreas y volúmenes de corteza vegetal, aplicando procesos de teledetección a partir de filtros en ortofotografías. La zona seleccionada fue el emblemático “Cerro de la Memoria” ubicado en la Ciudad de Los Mochis, Sinaloa, México. Se realizaron vuelos aerofotogramétricos en diferentes fechas, obteniéndose imágenes orto rectificadas del lugar. Mediante el empleo de una clasificación supervisada por el método de máxima verosimilitud, se dio respuesta a la primera variable (áreas de vegetación), mientras que en la segunda (volúmenes de vegetación) se recurrió a la confección y comparativa entre modelos digitales de elevación, específicamente modelos digitales de terreno y de vegetación. Se obtuvieron resultados relevantes en cuanto al uso de fotografías aéreas tomadas a baja altura, su procesamiento y el análisis en SIG, como punto de partida en el estudio de vegetación a través de imágenes de alta resolución.

Palabras clave: clasificación supervisada, fotogrametría, modelo digital de elevación, sensor digital, sustentabilidad.

IMPLEMENTATION OF AERIAL PHOTOGRAPHS AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS FOR THE DETERMINATION OF AREAS AND VOLUMES OF VEGETABLE BARK

Abstract

Vegetation represents one of the variables of greatest interest in mitigation the effects of climate change, for this reason, its analysis must be considered by different specialists from an investigative point of view that contributes to the Sustainable Development Goals (SDG). The purpose of this study is to establish new alternatives for sampling vegetal crust for its location, quantification and distribution on the earth's surface, using a grouping of techniques such as: digital photogrammetry, geographic information systems (GIS) and multi-temporal analysis. The methodology used is experimental with a quantitative approach, based on the use of photogrammetric data, taken to a rigorous validation process, based on two variables; areas and volumes of vegetal bark, applying remote sensing processes from filters in orthophotographs. The selected area was the emblematic “Cerro de la Memoria” located in the city of Los Mochis, Sinaloa, Mexico. Aero-photogrammetric flights were carried out on different dates, obtaining ortho rectified images of the place. By using a classification supervised by the maximum likelihood method, the first variable (vegetation areas) was answered, while the second variable (vegetation volumes) appealed the preparation and comparison between digital elevation models, specifically digital terrain and vegetation models. Relevant results were obtained regarding the use of aerial photographs taken at low altitudes, their processing and GIS analysis, as a starting point in the study of vegetation through high-resolution images.

Keywords: supervised classification, photogrammetry, digital elevation model, digital sensor, sustainability

Este capítulo es resultado de un proyecto de investigación terminado, denominado: Determinación de volúmenes en bancos de materiales pétreos a partir de levantamientos aéreos con cámaras fotográficas digitales convencionales.

Introducción

Hoy en día, existen cuatro tendencias globales que son de preocupación especial: a) la expansión demográfica y el aumento en el consumo per cápita, b) la degradación de suelos, c) los cambios atmosféricos mundiales y d) la pérdida de biodiversidad (Nebel, 1999).

Actualmente es de vital importancia hablar acerca de la educación ambiental como punto de partida para la preservación y conservación de los espacios y/o recursos naturales (Chirinos, et al., 2017), con el objetivo de lograr una mejor planificación del desarrollo sostenible, el cual se concibe según Barbera et al. (2019) como un proceso continuo orientado al logro de metas o propósitos comunes, establecidos mediante el diálogo y la comunicación entre los actores de una organización, comunidad, etc., para alcanzar una mejor calidad de vida. Es aquí, donde los convenios entre universidades públicas, conjuntamente con sus investigadores, unen esfuerzos en busca de soluciones a diferentes problemas observados en su entorno diario. Por tal motivo, la investigación propuesta, es retomada por diferentes universidades y especialidades (multidisciplinarias) para aportar a la agenda 2030 y los Objetivos del Desarrollo Sostenible, ODS13 “acción por el clima”.

El estudio de la vegetación se ha convertido en una de las variables con mayor peso en la mitigación de los efectos del cambio climático, por lo que su análisis debe estar presente en los temas de investigación de diferentes especialistas y la sociedad en general.

De acuerdo con Brown (1997), existen dos métodos para estimar la biomasa de un bosque. El primer método es destructivo y consiste en cortar los árboles y pesar la

biomasa directamente secando la madera. El segundo método es estimar la biomasa de manera indirecta por medio de modelos de regresión con variables obtenidas en el campo.

En México, la actual Dirección General de Geografía (DGG) ha tomado alrededor de 700 mil aerofotografías del territorio nacional, conforme a diversos criterios de zonificación que han cambiado con el tiempo. A partir de 1981, los vuelos fotográficos se realizan con arreglo a las definiciones del Sistema Nacional de Fotografía Aérea (SINFA), siendo las principales escalas de vuelo 1:75,000 para la actualización de la carta topográfica; 1:37,500, 1:40,000 y 1:20,000 para la elaboración de cartografía ejidal correspondiente al Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares Urbanos (PROCEDE) y Cartografía Censal, así como en algunos trabajos de fotointerpretación de recursos naturales (INEGI, 2000).

La principal desventaja de estos vuelos es que no contienen información suficiente para el monitoreo volumétrico de recursos naturales, ni para estudios detallados sobre volúmenes con corteza vegetal, por lo que se hace indispensable implementar tecnologías fotogramétricas que permitan obtener datos específicos que infieran en estas variables.

Los recursos naturales y el capital humano con que cuenta el país son factores fundamentales para el desarrollo económico y social, de ahí que el estudio y la evaluación de estos factores adquieran singular importancia. Por ello, es necesario contar con información suficiente, confiable y oportuna sobre estos aspectos, en diferentes niveles, y es quizá la información georeferenciada, ya sea manejada en mapas o por un sistema de información geográfica (SIG) la que ofrece mayores ventajas (INEGI, 2005).

Por lo anterior, la presente propuesta busca generar metodologías alternativas de bajo coste en el monitoreo de variables cuantitativas, como es el caso de áreas y volúmenes de corteza vegetal, que permitan apoyar a las políticas públicas en el manejo de biomasa arbórea extendidas sobre grandes extensiones de territorio, todo esto mediante el análisis de información geoespacial a través de la interpretación y procesamiento de imágenes aéreas obtenidas a baja altura.

Fundamentación teórica

En México, se han realizado una gran variedad de trabajos enfocados en el estudio para la estimación de biomasa arbórea utilizando como herramienta principal imágenes de satélite, principalmente Landsat (Escandón, et al., 1999; Ruiz, et al., 2014), dado que las imágenes satelitales adquiridas en diferentes fechas permiten observar la respuesta espectral de la superficie terrestre a lo largo del tiempo, incluyendo diferentes estados fenológicos, además de los estudios multi-temporales que permiten mejorar la capacidad de monitorear variables biofísicas respecto al uso de una única fecha (Cohen y Goward, 2004). Algunos investigadores no están muy de acuerdo con los resultados obtenidos (en la inferencia sobre imágenes satelitales), dada su complejidad en la utilización de procesos computacionales a través del análisis de firmas espectrales. Además una de las limitantes de este tipo de imágenes en la cuantificación volumétrica, es la poca resolución que ofrecen los insumos generados desde el sensor satelital y por ende afectan las precisiones obtenidas en los procesos posteriores.

Recientemente se han realizado publicaciones interesantes y que han impactado significativamente en el manejo de la información georeferenciada en gestiones ambientales, aquí el uso de los SIG ha tenido un papel fundamental, principalmente en la capacidad que tienen de elaborar Modelos Digitales de Elevación (MDE) (Olaya, 2014).

La utilidad principal de un SIG radica en su capacidad para construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales y en la utilización de esos modelos en la simulación de los efectos que un proceso de la naturaleza o una acción antrópica origina sobre un determinado escenario en una época específica, pudiendo comparar efectos con otras épocas o proyectar consecuencias.

Vázquez (2017) realizó un estudio sobre variables climáticas a través de la clasificación de mapas raster, apoyándose para ello en la utilización de 2 software de uso libre, Sextante de conjunto con gvSIG, donde diseñó un algoritmo de clasificación que permitió obtener un mapa con los mínimos, máximos o el promedio de dichas variables.

También se han realizado estudios importantes sobre contaminación de aguas subterráneas, tal es el caso de González et al. (2018), que aplicó un método desarrollado

con el apoyo del software ArcGis 10.1, donde integró un modelo de vulnerabilidad intrínseca y un inventario de fuentes contaminantes, para la determinación de los índices de peligrosidad y riesgo a la contaminación del agua subterránea en el estado de Yucatán.

Tal ha sido el avance de los SIG's que se están implementando también para realizar predicciones de impacto ambiental. Gómez et al. (2018) realizaron un análisis sobre un proyecto hipotético en el Norte y Noroeste de Antioquia (Colombia), para estudiar la respuesta de métodos matemáticos que permitieran obtener superficies de susceptibilidad ambiental y el impacto generado por infraestructuras de proyecto.

Metodología

En la presente investigación se empleó una metodología de tipo experimental con enfoque cuantitativo sobre el Cerro de la Memoria ubicado en la ciudad Los Mochis, Sinaloa, México (figura 1) con el objetivo de inferir sobre la vegetación existente en la zona mediante la toma de fotografías, su procesamiento y análisis en SIG.

Figura 1

Ubicación geográfica del Cerro de la Memoria

Fuente: elaboración propia (2019).

Para llevar a cabo el experimento se utilizó un avión Aerotrek A-240, una cámara fotográfica digital Hasselblad de 39 Mpixel, antenas GPS, una estación fotogramétrica digital con software Photoscan, AutoCad y el programa para sistema de información Geográfica ArcGIS, todos pertenecientes al laboratorio de Geomática en la Facultad de Ingeniería Mochis de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) en convenio con la universidad Autónoma Intercultural de Sinaloa (UAIS) como un proyecto de investigación compartido entre ambas.

El trabajo se realizó en función a dos variables cuantitativas (áreas y volúmenes de corteza vegetal) aplicando teledetección a partir de filtros en ortofotografías y una comparativa entre Modelos Digitales de Elevación. El Proceso metodológico se organizó considerando las siguientes fases (figura 2):

Figura 2

Esquema metodológico

Fuente: elaboración propia (2019).

Se realizaron dos vuelos comparativos, con avión tripulado a 500 m. de altura, que permitieron inferir sobre la vegetación del lugar a través de la fotointerpretación y el

procesamiento digital de imágenes. Uno de ellos se realizó en el mes de abril (con escasa vegetación) y el otro en el mes de octubre (con abundante vegetación), esto permitió realizar procesamientos independientes de cada ortofotografía para su posterior análisis en el SIG (figura 3).

Figura 3

Ortofotografías del procesamiento digital de imágenes

Fuente: elaboración propia (2019).

Con el objetivo de recoger la mayor información para el análisis de la vegetación, se confeccionaron 3 clases debido a la diferencia de tonalidades entre vegetación alta, mediana y de baja altura (pastizales), tomándose 454 regiones de interés que caracterizaron toda la vegetación extendida en la zona y otras 249 para la caracterización de veredas, terracerías, pavimentos y techumbres.

Durante la fase de asignación para la determinación de áreas se aplicó el método de clasificación Maximum Likelihood (máxima verosimilitud) el cual considera que los ND (Niveles Digitales) de cada categoría se ajustan a una distribución normal. Esto permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. Así, se pudo calcular la probabilidad de que

un determinado píxel pertenezca a una categoría; el cálculo se realiza para todas las categorías definidas y el píxel se clasifica en la clase a la cual tenga más probabilidad de pertenecer.

Este clasificador es el más complejo y, por lo tanto, el que mayor volumen de cálculo requiere, pero es el más robusto y fiable, ya que se ajusta fielmente a la distribución original de los datos.

$$p\left(\frac{x}{A}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_A^2}} e^{\left[-\frac{(ND_x - ND_A)^2}{2\sigma_A^2}\right]}$$

Donde:

$p(x/A)$ = probabilidad de que un cierto píxel x (definido por $ND\ x$) pertenezca a la clase A

ND_A = media de la clase A

σ_A^2 = varianza de la clase A

Una vez determinada la probabilidad para todas las categorías, el píxel será asignado a la clase A , sólo si:

$$p(x/A) \geq p\left(\frac{x}{B}\right)$$

Producto de la clasificación, se obtuvo un archivo de datos raster (figura 4) en el cual se observa la clasificación de áreas sobre el ortofoto RGB por el método de máxima verosimilitud de acuerdo al número y tipo de clase asignada.

Figura 4

Clasificación de áreas sobre ortofoto por el método de máxima verosimilitud

Fuente: elaboración propia (2019).

La determinación de volumen con corteza vegetal se realizó mediante comparativas de Modelos Digitales de Elevación. Los puntos identificados como vegetación por el método de máxima verosimilitud sobre el ortofoto del mes de octubre, adquirieron en esta etapa, la coordenada que materializa el eje vertical (Z) basándose en el modelo tridimensional dado por la nube de puntos densa el cual contiene únicamente puntos anclados en la materia vegetal. En esta nube densa se analizaron alrededor 28.9 millones de puntos clasificados como vegetación, suficiente información para realizar modelos digitales precisos sobre la misma en esta zona. Se parte de la teoría que el volumen de corteza vegetal existente entre dos superficies de referencia, en este caso modelos digitales de elevación, se puede expresar mediante una comparativa entre ambos.

Los puntos de terreno y vegetación fueron modelados aplicando el algoritmo IDW (ponderación inversa de la distancia), que es un método matemático de interpolación que usa una función inversa de la distancia. Parte del supuesto que las cosas que están más cerca son más parecidas, por lo tanto tienen más peso e influencia sobre el punto a estimar. Matemáticamente se expresa como:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i)$$

En el cual es el valor a predecir, N es el número de muestras alrededor del punto a predecir, λ_i son los pesos asignados a cada punto vecino y $Z(S_i)$ son los valores medidos. Los pesos de los puntos vecinos están dados por:

$$\lambda_i = \frac{d_{io}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{io}^{-p}}$$

Dónde (d) es la distancia entre el lugar de predicción (S_0) y el lugar muestreado (S_i); p es un factor de reducción de peso, cuyo valor se encuentra minimizando el error cuadrático medio o error de predicción. El primer modelo denominado MDT, consideró únicamente los puntos característicos del terreno natural para la representación de la superficie física extensible de la tierra (figura 5), discriminado vegetación o cualquier objeto ubicado sobre ella y el segundo modelo denominado Modelo Digital de Vegetación (MDV), que consideró, además de la superficie física terrestre, la superficie de vegetación extendida sobre ella, discriminando cualquier otro objeto (figura 6).

Figura 5

Clasificación de puntos de terreno natural en ortofoto del mes de abril

Fuente: elaboración propia (2019).

De esta manera se puede decir que el volumen con corteza vegetal puede ser calculado a través de modelos digitales de elevación mediante la relación:

$$VCC = \frac{MDV - MDT}{\sum A v}$$

Siendo:

VCC- Volumen con corteza vegetal

MDV- Modelo digital de vegetación

MDT- Modelo digital del terreno

Av- Áreas de vegetación

Figura 6

Clasificación de puntos de terreno natural y vegetación en ortofoto del mes de octubre

Fuente: elaboración propia (2019).

Con el objetivo de validar los resultados obtenidos en los modelos digitales (MDT y MDV), se establecieron 10 puntos de muestreos aleatorios de altura de vegetación en la zona estudiada, y se compararon con la respectiva diferencia altimétrica entre estos, ya que:

$$Hvi = Zi(mdv) - Zi(mdt) \quad \text{Sabido que} \quad Zi = f(xi, yi)$$

Por lo tanto, la estimación en la exactitud de alturas sobre la vegetación en un punto cualquiera del modelo se puede expresar mediante:

$$Hvi' - Hvi = 0$$

La expresión anterior es la esperanza matemática en el supuesto de que las alturas de vegetación encontradas mediante la comparativa de modelos digitales, correspondan exactamente a las alturas medidas directamente en el terreno con otros métodos (cinta, trigonometría, estatal, etc.).

Esto permitió valorar el proceso en la confección el modelo digital de vegetación, ya que la expresión para la estimación de la exactitud en las alturas de materia vegetal se adecuó a:

$$Hvi' - Hvi = ei$$

Dónde:

Hvi = Altura de vegetación en las coordenadas del punto “i”

$Zi(mdv)$ = elevación del punto “i” sobre el modelo digital de vegetación

$Zi(mdt)$ = elevación del punto “i” sobre el modelo digital de terreno

Hvi' = Altura de vegetación en las coordenadas del punto «i» en muestreo de campo

ei = error altimétrico del punto «i»

Se aplicó un análisis de errores mediante el estadístico S (Desviación estándar o típica) en el cual se consideró un error medio comparado con cada uno de los errores en los 10 muestreos:

$$S = \sqrt{\sum (ei - e)^2 / n - 1}$$

Resultados

Se confeccionó un mapa denominado “Mapa temático de vegetación” (figura 7) que contiene información sobre tres tipos de vegetación, áreas definidas como veredas o terracerías y áreas pertenecientes a construcciones con pavimentos o techumbres. Se determinó el área del píxel en el terreno (0.0208 m²) y a partir de este último, se calcularon las áreas (tabla 1) de cada una de las clases asignadas en la ortofotografía.

Tabla 1

Clasificación digital del ortofoto Cerro de la Memoria

Clase	Número Píxeles	Área (ha)	%
Vegetación 1	6.058.616	12.615799	19
Vegetación 2	15.831.502	32.965789	48
Vegetación 3	7.044.806	14.669334	22
veredas-terracerías	1.556.127	3.240308	5
Pavimentos-techumbres	1.754.977	3.654372	6
TOTAL	32.246.028	67.1456042	100 %

Fuente: elaboración propia (2019).

Para el cálculo de materia vegetal se sumaron las tres primeras clases, teniendo un total de área clasificada como vegetación expresada de la siguiente manera:

$$\text{Área de vegetación} = \text{Veg.1} + \text{Veg.2} + \text{Veg.3} = 60.2509232 \text{ ha}$$

Esta superficie calculada corresponde al 89 % de la clasificación total en el ortofoto RGB, el otro 11 % pertenece a las 2 clases restantes.

Figura 7

Mapa temático de vegetación, máxima verosimilitud

Fuente: elaboración propia (2019).

Para la determinación del volumen de corteza vegetal mediante comparativas de Modelos digitales de elevación, se analizaron detalladamente los modelos digitales, tanto de terreno natural como de vegetación, realizando un cálculo por estratos a cada 10 metros de altitud sobre la zona, de tal manera que la información obtenida sobre la vegetación fuera analizada por sectores o polígonos bien definidos.

El volumen de vegetación por estrato a cada 10 metros fue determinado calculando las diferencias entre los dos modelos (modelados en Arcgis) expresándose como:

$$\Delta Vi = MDVi - MDTi$$

Donde;

(i) es el estrato estudiado dado por la relación entre dos datos altitudinales consecutivos,

$$i = Hs - Hi$$

Siendo (Hs) la altura que delimita al estrato en la parte superior, (Hi) la altura que delimita al estrato en la parte inferior, (ΔVi) es la diferencia de volúmenes en el estrato “i”, (MDV_i) el volumen calculado hasta el estrato “i” sobre el modelo digital de vegetación y (MDT_i) el volumen calculado hasta el estrato “i” sobre el modelo digital de terreno. En la tabla 2, se muestra el análisis de vegetación por estratos verticales a cada 10 metros mediante la comparativa de los modelos MDT y MDV.

Tabla 2

Análisis de vegetación por estratos en Cerro de la Memoria

ESTRATO N°	Hi (m)	Hs (m)	Hs-Hi (m)	MDVi-MDTi (m³)
1	14.0	20.0	6.0	31 153.51
2	20.0	30.0	10.0	43 514.23
3	30.0	40.0	10.0	42 995.56
4	40.0	50.0	10.0	45 560.73
5	50.0	60.0	10.0	42 703.82
6	60.0	70.0	10.0	39 024.13
7	70.0	80.0	10.0	40 937.31
8	80.0	90.0	10.0	37 606.46
9	90.0	100.0	10.0	30 947.48
10	100.0	110.0	10.0	30 824.21
11	110.0	120.0	10.0	37 337.9
12	120.0	130.0	10.0	18 834.29
13	130.0	140.0	10.0	29 726.37
14	140.0	150.0	10.0	16 564.14
Σ TOTAL				487 730.14

Fuente: elaboración propia (2019).

Como resultado del procesamiento de modelos digitales, se obtuvo que para las 60.2509 ha de superficie con vegetación para las 3 clases (V1, V2 y V3) le corresponde un volumen total de 487.730,14 m³.

Por lo tanto el volumen con corteza vegetal en el Cerro de la Memoria se determinó por la relación:

$$VCC = \frac{MDV - MDT}{\sum A_v} = 487\,730.14 \text{ m}^3 / 60.2509 \text{ ha} = 8\,095 \text{ m}^3/\text{ha}$$

De acuerdo a los estadísticos obtenidos en la confección de los modelos digitales de terreno y modelos digitales de vegetación para la cuantificación de volumen con corteza vegetal, tenemos que la desviación estándar entre estos fue de $S=0.17$ m. Esto indica, con un grado alto de probabilidad, que el objeto de estudio cuenta con un volumen de corteza vegetal de 8.095 m³/ha (para la fecha en que fue creado el ortofoto y los MDE).

Dado que estos resultados están dados a partir de MDE, se tiene la posibilidad de realizar consultas espaciales por estratos altitudinales. Se observó que el estrato que presenta mayor volumen de vegetación según estudio es el número 4, con aproximadamente 45.560 m³ equivalente al 9.3 % del volumen de vegetación total, que corresponde al definido entre las alturas 40 y 50 m.

En el mapa temático obtenido del Cerro de la Memoria se pueden realizar consultas espaciales referentes a cuantificación de alturas, áreas y volúmenes de vegetación, además de diferentes zonas o construcciones de impacto como antenas de comunicación, caminos, veredas, la ciclo vía, entre otras, que puedan analizarse desde diferentes puntos de vista, en apoyo al ordenamiento integral del lugar.

Conclusiones

Dentro de las ventajas más importantes que ofrecen los levantamientos aéreos con fines fotogramétricos, podemos mencionar: la panorámica de conjunto ofrecida por las imágenes al momento de realizar un análisis integral de los recursos naturales, la calidad

técnica en la obtención de resultados, la notoria reducción de costo-tiempo y el alto nivel de detalle en las características de las zonas de estudio.

En este sentido, contar con metodologías e instrumentos tecnológicos que permitan determinar cierto nivel de inventario de recursos naturales, en general, es de suma importancia en términos de valor social, económico y ecológico. Por todo esto, se puede concluir que los levantamientos aéreos trabajados bajo ciertos criterios de captura y procesamiento de información, aportan datos muy significativos para realizar inferencias sobre vegetación, además de ser factibles en términos de tiempo, costo y calidad de resultados.

La metodología empleada en los muestreos aéreos, el procesamiento de información con diferente software y la representación de los resultados obtenidos, contienen un alto rigor científico y metodológico, por lo que puede ser considerada en niveles de licenciatura y posgrado en aquellas academias que se involucran con investigaciones afines a cuantificación de recursos naturales.

Esta investigación puede retomarse como punto de partida para los estudios de enfermedades de plantas, determinadas a través de imágenes aéreas de baja altura y gran resolución. Esto mediante la incorporación de cámaras espectrales y multispectrales montadas en aviones o drones que permitan, además del análisis de distribución y abundancia sobre un territorio dado, conocer detalladamente el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), apoyándose en ortofotos RGB de alta resolución (del rango visible) en combinación con la clasificación de las imágenes multispectrales (del rango no visible).

Referencias bibliográficas

- Barbera, N., Chirinos, Y. y Posada, M. (2019). *La planificación del desarrollo sostenible desde los sistemas complejos adaptativos en Colombia*. En Chirinos, Y., Ramírez, A., Godínez, R., Barbera N. y Rojas, D. (2019). (Eds.). *Tendencias en la Investigación Universitaria. Una visión desde Latinoamérica.*, 5 (12), 24-42. Coro, Venezuela. Fondo Editorial Salvador Garcés.

- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forest*. FAO Forestry paper, 134.
- Chirinos, Y., González, C., Meriño, V. y Martínez, C. (2017). La educación ambiental en el proyecto educativo integral comunitaria: una reflexión desde la participación en comunidades escolares. En: Chirinos, Y., Ramírez, A., Rodríguez, E., Pérez, C. y Camejo, L. (Eds.). *Tendencias en la Investigación Universitaria. Una visión desde Latinoamérica.*, 1 (12), 3-31. Coro, Venezuela. Fondo Editorial Salvador Garcés.
- Cohen, W. y Goward, S. (2004). Landsat's role in ecological applications of remote sensing. *Bioscience* 54, 535-545, doi: 10.1641/0006-3568(2004)054[0535:LRIEAO]2.0.CO;2.
- Escandón, J., Ben, H., Ochoa, S., March, I. y Castillo, M. (1999). *Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos Landsat TM en Jusnajib La Laguna, Chiapas, México: estudio de caso*. Investigaciones Geográficas 40: 71-84.
- Gómez, O., Horfan, D. y Londoño L. (2018). *Análisis multicriterio SIG basado en momentos de orden superior normalizados para el cálculo de superficies de viabilidad ambiental*. Ingenierías USBMed, 9 (1), 49-57.
- González, R., Albornoz, B., Sánchez, I. y Osorio J. (2018). *El acuífero Yucateco*. Análisis del riesgo de contaminación con apoyo de un Sistema de Información Geográfica. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 34, 667-683.
- INEGI. (2000). *Sistema Nacional de Fotografía Aérea; SINFA*. INEGI.
- INEGI. (2005). *Guía para la interpretación de cartografía; fotografía aérea*. INEGI.
- Nebel, B. (1999). *Ciencias Ambientales, Ecología y desarrollo sostenible*. Pearson Educación, 698.

- Olaya, V. (2014). *Sistemas de información geográfica*. https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf.
- Ruiz, C., Rodríguez, G., Leyva, J. y Enríquez, J. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México. *Naturaleza y Desarrollo* 12(1): 28-45.
- Vázquez, R. (2017). Uso de sistemas de información geográfica libres para la protección del medio ambiente. Caso de estudio: manipulación de mapas ráster con datos climáticos. *Universidad y Sociedad*, 10 (2), 158-164.