

REVISTA TIA

- Revista TIA - Tecnología, Investigación y Academia -
Publicación Facultad de Ingeniería y Red de Investigaciones de Tecnología Avanzada - RITA

Modelo de fácil y económica implementación para evaluación de pérdida de bosques naturales *Easy and inexpensive to implement model for natural forest loss assessment*

Juan Fernando García-Julio¹ y Jhon F Escobar²

Citar este documento: García-Julio, J.F. y Escobar, J.F. (2022). Modelo de fácil y económica implementación para evaluación de pérdida de bosques naturales. Revista TIA - Tecnología, Investigación y Academia, 9(2), 17-30.

¹ Especialista en Sistemas de Información Geográfica, Universidad de San Buenaventura; Corporación Autónoma del Centro de Antioquia Corantioquia; jugarcia@corantioquia.gov.co

² PhD en Administración, Universidad Nacional de Misiones; Corporación Universitaria Remington; jhon.escobar@uniremington.edu.co.

Resumen. La degradación de los bosques naturales es un problema que amenaza la vida en el planeta y que debe ser entendida y atendida en todas las escalas de análisis territorial, especialmente en el ámbito municipal o a pequeña escala, escenario donde se pueden desarrollar las intervenciones de mitigación y recuperación de mayor impacto. No obstante, los reportes de deforestación disponibles se presentan en una escala de aproximación nacional y regional, los cuales se convierten en instrumentos informativos más que operativos. Por otro lado, en Colombia el 87% de los municipios cuentan con pocos recursos para inversión, lo que implica que tienen restricciones de acceso para la compra de imágenes satelitales, así como para la contratación de recurso humano especializado para su procesamiento. El artículo desarrolla un modelo de fácil y económica implementación, para la estimación de procesos de deforestación a pequeña escala (1:10000), y de manera indirecta de estimación de emisiones atmosféricas de CO₂ equivalente asociadas a este fenómeno, mediante un análisis multitemporal utilizando imágenes satelitales adquiridas en la plataforma Google Earth Engine® de carácter gratuitas. El proceso de deforestación se describe utilizando la clasificación supervisada por el método de máxima verosimilitud, se cuantifican las áreas de bosque y no bosque.

Palabras Clave. Monitoreo; Deforestación; Sistemas de Información Geográficos; Evaluación de coberturas boscosas.

Abstract. The degradation of natural forests is a problem that threatens life on the planet and must be understood and addressed at all scales of territorial analysis, especially at the municipal or small-scale level, where the most impactful mitigation and recovery interventions can be developed. However, the available deforestation reports are presented on a national and regional approximation scale, which become informative rather than operative instruments. On the other hand, in Colombia, 87% of the municipalities have few resources for investment, which implies that they have access restrictions for the purchase of satellite images, as well as for the hiring of specialized human resources for their processing. The article develops a model of easy and economic implementation, for the estimation of deforestation processes at small scale (1:10000), and indirectly for the estimation of atmospheric emissions of CO₂ equivalent associated to this phenomenon, by means of a multitemporal analysis using satellite images acquired in the Google Earth Engine® platform, free of charge. The deforestation process is described using the supervised classification by the maximum likelihood method, forest and non-forest areas are quantified..

Key words. Monitoring; Deforestation; Geographic Information Systems; Forest cover assessment.

Introducción

La teledetección es la técnica que permite la obtención de información de la superficie terrestre sin estar en contacto con ella, detecta cambios en la radiación que producen los objetos a medir en determinada superficie, este proceso no solo engloba la consecución de la imagen sino la obtención de información y el tratamiento que se le dé (Chuvieco & Huete, 2009).

Con la teledetección se obtienen imágenes satelitales con las cuales es posible realizar estudios multitemporales, que son análisis de tipo espacial realizados por medio de la comparación de las coberturas interpretadas en dichas imágenes para diferentes periodos de tiempo, pero en la misma zona de estudio. Esta técnica permite evaluar los cambios de las coberturas que han sido encontradas con la clasificación, logrando inferir los cambios

que se han presentado en la superficie terrestre, ya sea por causas naturales o antrópicas (Chuvienco & Huete, 2009; Lange-Gonzalez, 2018; Velastegui-Montoya et al., 2020; Veloza, 2017)

Con los satélites se obtienen imágenes de la superficie terrestre, a estas se les realiza el proceso de clasificación supervisada, el cual es un método de clasificación de imágenes satelitales en el cual el intérprete le indica a un software de procesamiento de imágenes, de acuerdo con el conocimiento de la zona de estudio o por conocimiento previo los tipos de cobertura presentes en este lugar, la definición de las zonas conocidas se describe como áreas o campos de entrenamiento (Chuvienco & Huete, 2009; Fernández et al., 2011; Gomariz-Castillo et al., 2014; Minhoni et al., 2021)

Fundamentals of Satellite Remote Sensing discusses a wide range of topics, from physical principles to data acquisition systems and on to visual and digital interpretation techniques. The text focuses on the interpretation and analysis of remote sensing images and how they improve our understanding of environmental processes and their interaction with human activities. The authors discuss new interpretation approaches, including hyperspectral analysis, high-spatial resolution data, and radiative transfer models. The presentation includes an analysis of accuracy assessment methods and demonstrates how to integrate remote sensing results with geographic information systems. It also covers recent missions, such as Terra-Aqua, Envisat, Ikonos-Quickbird-Geoeye and SPOT-5, as well as LIDAR and interferometric radar.

The discussion of visual criteria to extract interpretation from satellite images emphasizes differences and similarities with conventional photo-interpretation techniques. A chapter on accuracy assessment and the connection between remote sensing and geographic information systems helps readers extend the interpretation of satellite images to a more operational, applications-oriented framework.”,”author”:[{“dropping-particle”:””,“family”:”Chuvienco”,”given”:”Emilio”,”non-dropping-particle”:””,“parse-names”:false,”suffix”:””}],{“dropping-particle”:””,“family”:”Huete”,”given”:”Alfredo”,”non-dropping-particle”:””,“parse-names”:false,”suffix”:””}],”container-title”:”Fundamentals of Satellite Remote Sensing”,”id”:”ITEM-1”,”issued”:{“date-parts”:[["2009"]]},”number-of-pages”:"1-419",”title”:”Fundamentals of satellite remote sensing”,”type”:"book"},”uris”:[“http://www.mendeley.com/documents/?uuid=13984b35-d825-460c-a52d-5f72d74b8a0f”]},{“id”:”ITEM-2”,”itemData”:{“author”:[{“dropping-particle”:””,“family”:”Gomariz-Castillo”,”given”:”F”,”non-dropping-particle”:””,“parse-names”:false,”suffix”:””}],{“dropping-particle”:””,“family”:”Alonso-Sarría”,”given”:”F”,”non-dropping-particle”:””,“parse-names”:false,”suffix”:””}],{“dropping-particle”:””,“family”:”Cánovas-García”,”given”:”F”,”non-dropping-particle”:””,“parse-names”:false,”suffix”:””}],”container-title”:”XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica”,”id”:”ITEM-2”,”issued”:{“date-parts”:[["2014"]]},”title”:”Clasificación multitemporal de usos del suelo en la Cuenca del Río Vinalopó (Comunidad Valenciana)

Esta clasificación es resaltada por Abburu & Babu Golla (2015)”author”:[{“dropping-particle”:””,“family”:”Abburu”,”given”:”Sunitha”,”non-dropping-particle”:””,“parse-names”:false,”suffix”:””}],{“dropping-particle”:””,“family”:”Babu Golla”,”given”:”Suresh”,”non-dropping-particle”:””,“parse-names”:false,”suffix”:””}],”container-title”:”International Journal of Computer Applications”,”id”:”ITEM-1”,”issue”:"8",”issued”:{“date-parts”:[["2015"]]},”page”:"20-25",”title”:”Satellite Image Classification Methods and Techniques: A Review”,”type”:"article-journal",”volume”:"119"},”uris”:[“http://www.mendeley.com/documents/?uuid=fe458451-bec7-4924-9816-826e24fc151c”]},{“mendeley”:{“formattedCitation”:(Abburu & Babu Golla, 2015 por medio del método de Máxima Verosimilitud en su investigación sobre las metodologías para clasificar imágenes satelitales, en la mayoría de los casos para el sistema Landsat, también se resalta por ser el método paramétrico más utilizado por su sencillez y rapidez de cómputo y está basado en el uso del vector varianzas-covarianzas para estimar la probabilidad de pertenencia y asignación del píxel a una clase (Gomariz-Castillo et al., 2014)

Un ejemplo de estas aplicaciones las desarrolla Belgiu & Drăgu (2016) using a randomly selected subset of training samples and variables. This classifier has become popular within the remote sensing community due to the accuracy of its classifications. The overall objective of this work was to review the utilization of RF classifier in remote sensing. This review has revealed that RF classifier can successfully handle high data dimensionality and multicollinearity, being both fast and insensitive to overfitting. It is, however, sensitive to the sampling design. The variable importance (VI) quienes estudian la clasificación supervisada por el método Random Forest, el cual se ha vuelto popular para clasificar imágenes satelitales debido a la precisión que se obtiene con este, dado que puede manejar con éxito una alta densidad de datos para clasificar (W. Liu et al., 2018).

Para validar la precisión del método de clasificación supervisada se utilizará el índice de Kappa el cual fue propuesto por (Willington et al., 2013) el cual se basa en el uso de matrices de confusión, siendo éste un método común para validar este tipo de clasificaciones, la matriz contiene información sobre valores totales o porcentajes de datos observados y estimados para cada una de las clases buscadas y a partir de esta se estiman los parámetros de confiabilidad.

El Problema

En Colombia, durante el año 2018 se pierden unas 197159 ha, el equivalente de una cancha de futbol cada dos minutos; para el departamento de Antioquia se perdieron en 2017 un total de 47743 ha de bosque y en el año 2019 se presentó una pérdida de 24327 ha y para la jurisdicción de La CAR del Centro de Antioquia, CORANTIOQUIA, entidad ambiental del territorio analizado, se talaron aproximadamente 12000 ha durante el mismo año (IDEAM, 2019b).

Los datos de deforestación presentados por las entidades oficiales en Colombia se tienen para áreas muy grandes, ya sea, por departamento o jurisdicción de CAR y no son óptimos para realizar análisis a nivel micro o de municipio, que permita hacer seguimiento y monitoreo la labor de las autoridades ambientales. Es por lo que se requiere información asequible, confiable y precisa sobre las tendencias y el comportamiento de las áreas de uso forestal en todas las escalas, ya que dicho insumo es de gran ayuda para los gobiernos y las entidades encargadas de administrar los recursos naturales.

Metodología

En la investigación se utilizaron imágenes satelitales de Sentinel 2, y de Landsat 8 para medir las áreas de bosque en una fecha específica y mediante el análisis multitemporal de varias imágenes para la misma zona, se infiere de manera precisa cómo va cambiando el bosque a lo largo de una época determinada, el procedimiento utilizado es el de la clasificación supervisada para áreas boscosas utilizando el método de máxima verosimilitud, usando la plataforma Google Earth Engine®. Con ello se desarrolló una metodología para estimación en escala 1:10000 de la pérdida de bosques y la liberación de carbono, tal como se presenta en la Figura 1.

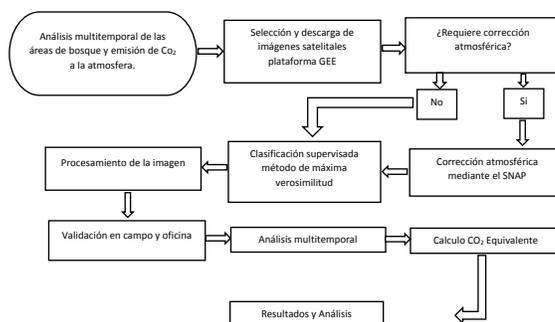


Figura 1. Metodología desarrollada en el estudio.

Área de estudio

Como caso de estudio se aplicó la metodología desarrollada para el municipio de Remedios, localizado en el departamento de Antioquia, Colombia (ver Figura 2). El municipio posee un área de 198376 ha en la zona rural y 399 ha en la zona urbana (Gobernación de Antioquia, 2019). Del área total del municipio el 47,01 % le corresponde a la zona de reserva forestal del Magdalena 93257 ha más 12634 ha en bosques por fuera de la reserva, para un total de 105891 ha en bosque natural, (Municipio de Remedios, 1999), convirtiendo los bosques de Remedios en los últimos grandes relictos boscosos del departamento de Antioquia.

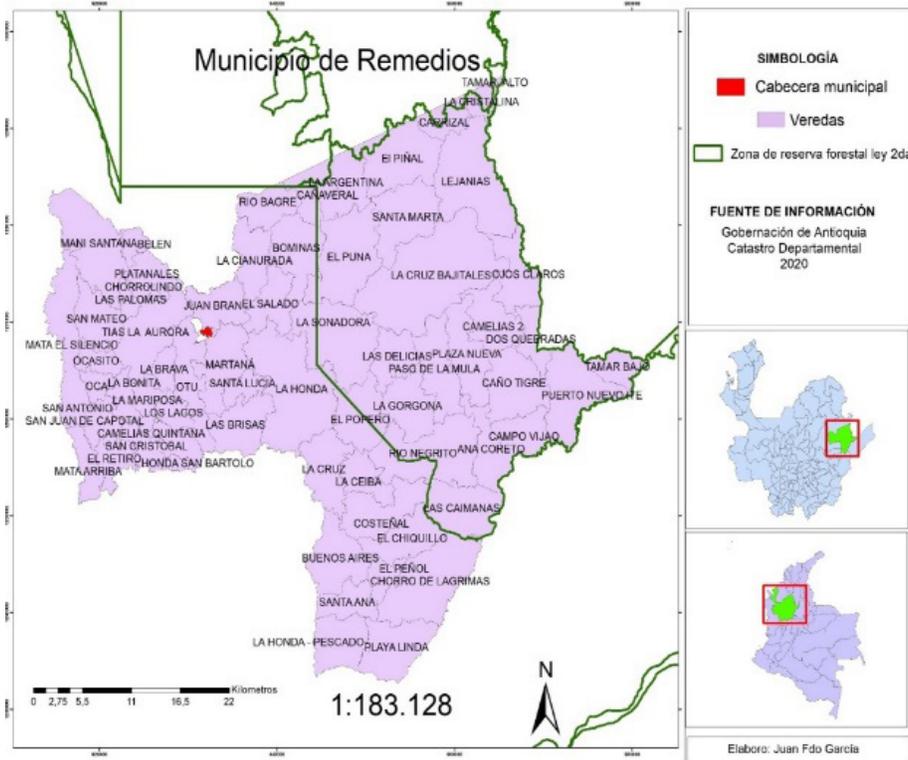


Figura 2. Mapa de ubicación de la zona de estudio -municipio de Remedios-
Fuente: Adaptada de Gobernación de Antioquia (2019)

Datos y Preprocesamiento

La metodología utilizada se basa en el análisis e interpretación de imágenes satelitales mediante el método de clasificación supervisada, para el procesamiento de las imágenes se utiliza el software Arc Map 10,6 de Arcgis, Qgis, software Sentinel Application Platform -SNAP- de la Agencia Espacial Europea -ESA- y la plataforma Google Earth Engine.

Usando la plataforma Google Earth Engine se descargaron 13 imágenes satelitales de los sistemas Sentinel 2 y Landsat 8 entre los años 2014 y 2020 que contienen el municipio de Remedios, las imágenes Sentinel 2 tienen una resolución espacial de 10 metros en la banda RGB, y de Landsat 8 de 30 metros que puede ser reescalada hasta los 15 metros con base en técnicas computacionales, teniendo en cuenta que en esta plataforma es posible realizar un compuesto sin nubes para el periodo de estudio con algoritmos de enmascaramiento, para las imágenes encontradas que tienen una cobertura de nubes aceptable, menor al 20 % se descarga la imagen sin realizar compuesto temporal, para el resto de las imágenes si se realiza; se utiliza una imagen semestral correspondiente a los meses de enero y julio, esto con el fin de evaluar la deforestación cada 6 meses.

Análisis de la información.

Utilizando el software ArcGIS® 10.6 de ESRI se procede a realizar la composición de las bandas RGB de cada una de las imágenes satelitales descargadas, la mezcla de color verdadero se obtiene de la combinación de las bandas 4, 3 y 2 respectivamente para el caso de ambas plataformas satelitales, utilizando la herramienta de geoprocesamiento -Clip- se selecciona el área de estudio correspondiente al municipio de Remedios y sobre éste se realizaron las clasificaciones.

Las áreas de bosque presentes en las imágenes satelitales seleccionadas se clasifican mediante el método de máxima verosimilitud, utilizando áreas de entrenamiento de tres clases: una para bosque, una para nubes y otra para las demás coberturas de la tierra, dicho método es recomendado por varios investigadores por su sencillez y rapidez de cómputo.

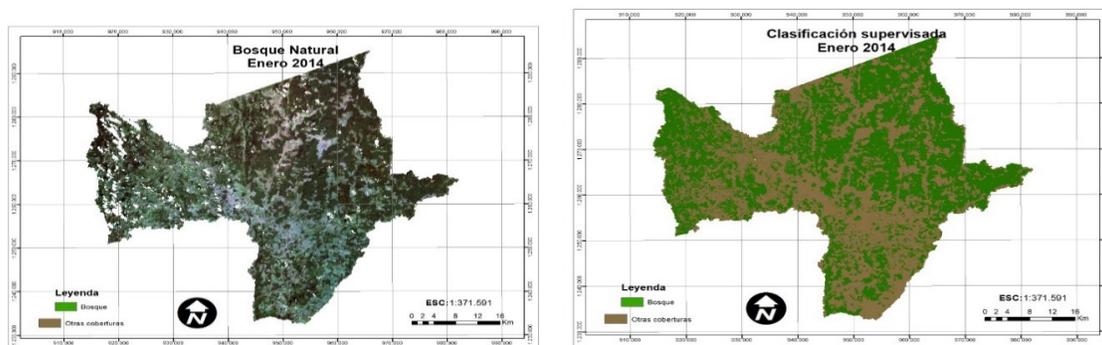
Con la clasificación supervisada se generan mapas dicotómicos de bosque y no bosque para cada una de las épocas seleccionadas, luego se procede a realizar la validación de los resultados seleccionando y guardando puntos aleatorios dentro de la zona de estudio, llevando el registro de la cobertura que realmente se encuentra en campo para luego validarla en el mapa obtenido.

Posterior a estos procesos y teniendo en cuenta una confiabilidad del método de clasificación supervisada mediante el índice de Kappa superior al 90 %, se realiza el análisis multitemporal donde se determina la variación de las áreas de bosque de un momento determinado al siguiente y la variación del momento inicial al final de análisis, es decir desde el año 2015 hasta el año 2020; generando mapas de bosque y no bosque para cada una de las etapas señaladas.

Conociendo las áreas taladas y las remanentes de bosque natural se procede a realizar el cálculo de la biomasa aérea, carbono total y dióxido de carbono equivalente para las áreas encontradas en la presente investigación, estimando la emisión de CO₂ que es uno de los principales gases de efecto invernadero; las etapas de la metodología propuesta se muestran en la Figura 1.

Resultados

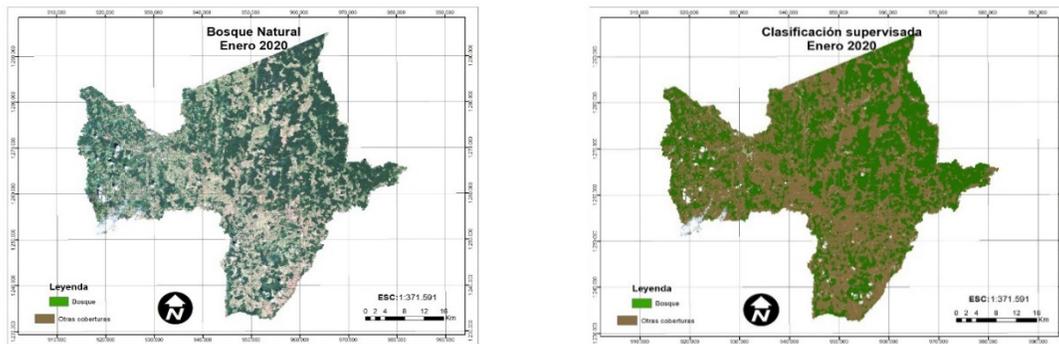
Utilizando las imágenes satelitales obtenidas entre los años 2014 y 2020 se caracterizan las áreas de bosque y no, cuantificando para cada periodo de análisis los usos del suelo, para el año 2014 se presenta el mapa de bosque no bosque con Landsat 8 (ver Figura 3).



a. Imagen de bosque y no bosque para enero de 2014 b. Mapa de bosque y no bosque para enero de 2014

Figura 3. Imagen cruda Landsat y procesada mediante clasificación supervisada.
Fuente: Elaboración propia con base en imágenes satelitales Landsat 8.

Y los mismos resultados, para el año 2020, se obtuvieron los resultados con Sentinel 2, (ver Figura 4) donde se resalta bosque y no bosque

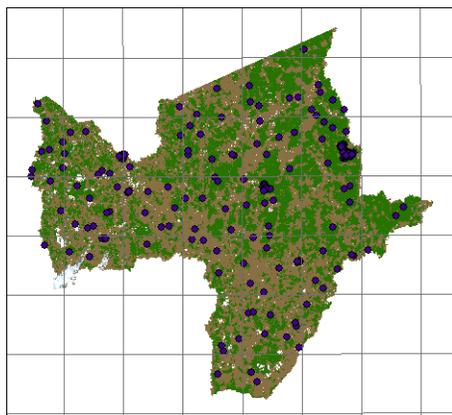


a. Imagen de bosque y no bosque para enero de 2020 b. Mapa de bosque y no bosque para enero de 2020.

Figura 4. Imagen cruda Sentinel 2 y procesada mediante clasificación supervisada.

Fuente: Elaboración propia con base en imágenes satelitales Sentinel 2.

Para validar la clasificación supervisada se utiliza la matriz de confusión para el periodo de estudio de enero de 2020, en la Figura 5 a se evidencian los 160 puntos aleatorios definidos dentro del área del municipio de Remedios, coordenadas planas Magna Sirgas origen Bogotá. En la Figura 5 b se presenta la matriz de confusión.



a. Puntos aleatorios base de la matriz de confusión

		Productor			Total
		Nubes	Otros	Bosque	
Usuario	Nubes	9	1	0	10
	Otros	2	44	4	50
	Bosque	0	4	96	100
Total		11	49	100	160

b. Matriz de confusión

Figura 5. Puntos y matriz de confusión 2020.

Estimación tasa de deforestación

Aplicando la metodología se determinaron las áreas de bosque natural remanente y taladas semestralmente durante el periodo de estudio comprendido entre los años 2014 y 2020 encontradas mediante la clasificación supervisada por el método de máxima verosimilitud, donde se evidencia como en el periodo de tiempo comprendido entre enero de 2017 y julio de 2017 se presentó la mayor deforestación en la zona de estudio con 3593 ha taladas equivalente al 3,74 % de los bosques naturales del municipio de Remedios encontrados para enero del 2014, seguido por el periodo de tiempo comprendido entre julio de 2016 y enero de 2017 con 2.925 ha taladas equivalente al 2,96 % de los bosques naturales y en tercer lugar se encuentra el periodo de tiempo comprendido entre enero de 2015 y julio de 2015 con 2402 ha taladas, equivalente al 2,35 % de los bosques naturales.

Los mayores picos de deforestación encontrados en el municipio de Remedios fueron en los periodos correspondiente a enero de 2017 y julio de 2017 con 2925 ha y 3593 ha respectivamente (Figura 6), lo cual coincide con la desmovilización y el tratado de paz firmado entre el gobierno nacional y las FARC, los cuales eran un actor en la zona, con una influencia considerable que no permite actividades de talas masivas en los territorios que controla.

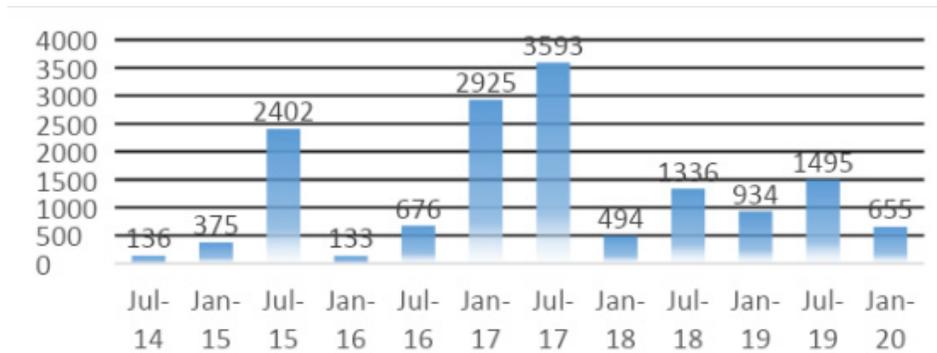


Figura 6. Deforestación en ha por semestre, en el municipio de Remedios, año 2014 al año 2020

Identificación de procesos de deforestación a pequeña escala (1:20000)

Para ejemplificar el proceso de identificación, caracterización y análisis de imágenes por el método propuesto, se presenta la misma zona (Figura 7), donde luego de un monitoreo se señala un proceso de deforestación a pequeña escala. Dado que el proceso es automatizado, la identificación de acciones de deforestación y el monitoreo constante brinda los insumos para hacer seguimiento a regiones amplias para identificar cambios en las coberturas a pequeña escala o escala municipal.

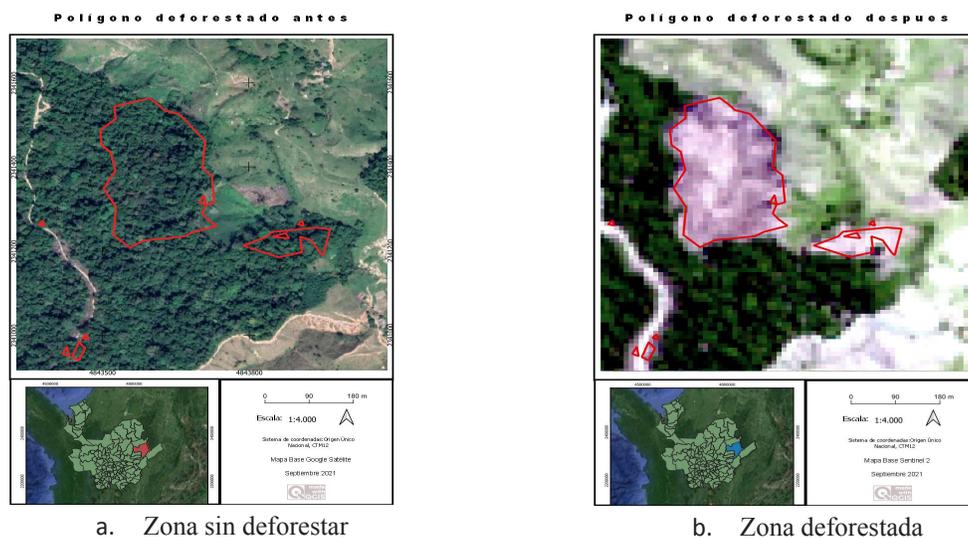


Figura 7. Cambios en cobertura, evidenciada por monitoreo semestres, resaltada mediante clasificación supervisada a escala 1:4000.

Estimaciones de carbono

Los resultados obtenidos en este estudio de la cuantificación de la biomasa aérea, el carbono y el CO2 equivalente, tanto los captados como los emitidos, encontrados durante el periodo de estudio se muestran en la Figura 8. Estos valores son producto de la estimación basada en las áreas de bosque y la deforestación estimada por el método aplicado.

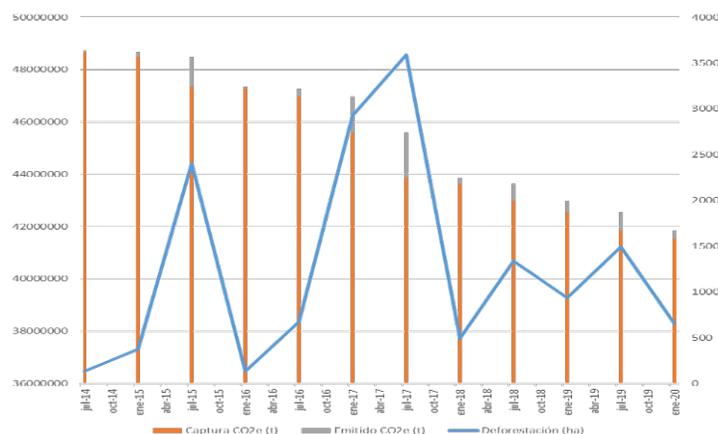


Figura 8. Biomasa aérea, carbono y CO2 equivalente capturado y emitido durante el periodo de estudio.

Para el mes de enero del año 2020 se encuentran capturados en los bosques del municipio de Remedios 22642617,3 toneladas (t) de biomasa aérea, 11316935,8 t de carbono y 41532454,7 t de CO2 equivalente. Durante el periodo de análisis entre los años 2014 y 2020 por la deforestación de las 15154 ha de bosque natural se han perdido 3923370,6 t de biomasa aérea, 1960927,6 t de carbono y se han emitido a la atmósfera 7196483,1 t CO2 equivalente.

Discusión

Según el estudio del IDEAM (IDEAM, 2019), la deforestación en Colombia para el año 2018 fue de 197159 ha; el promedio de deforestación anual encontrada en el presente estudio es equivalente a 2525 ha, por lo tanto la deforestación en el municipio de Remedios representa el 1,28 % de todo el territorio nacional para el año 2018; la deforestación reportada para el departamento de Antioquia en el mismo estudio es de 12820 ha, por lo que la deforestación del municipio de Remedios es equivalente al 19,69 % del departamento; para la jurisdicción de Corantioquia el estudio del IDEAM presenta una deforestación de 10030 ha por lo que la deforestación del municipio de Remedios es equivalente al 25,17 % de la jurisdicción de Corantioquia.

Para comparar las áreas de bosque obtenidas para cada año se realiza la comparación con otros métodos de clasificación supervisada como es el Random Forest o con otros estudios que clasifican las coberturas boscosas como el estudio de Hansen et al. (2013) del mapa de deforestación mundial entre los años 2000 y 2012 el cual actualmente se encuentra actualizado hasta el año 2018 y el mapa de bosque no bosque del Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono del IDEAM (IDEAM, 2019b) que igualmente se encuentra disponible hasta el año 2018; mediante una prueba de medias por el método de Duncan (García-Villalpando et al., 2001) se calculan los resultados obtenidos, donde se obtiene que la clasificación por el método de Máxima Verosimilitud estadísticamente es similar a la de Random Forest y a las áreas de bosque obtenidas por el estudio de Hansen, con un nivel de confianza del 95 %.

Para el mes de enero del año 2020 se encuentran capturados en los bosques del municipio de Remedios 22642617,3 t de biomasa aérea, 11316935,8 t de carbón y 41532454,7 t CO2 equivalente. Durante el periodo de análisis entre los años 2014 y 2020 por la deforestación de las 15154 ha de bosque natural se han perdido 3.923.370,6 t de biomasa aérea, 1960927,6 t de carbón y se han emitido a la atmósfera 7196483,1 t CO2 equivalente, valores que corresponden al modelo de estimación definido por (Yepes, A., Navarrete D.A., Phillips J.F., Duque, A.J., Cabrera, E., Galindo, G., Vargas, D., García & M.F., 2011).

Según el estudio del IDEAM (IDEAM, PNUD, MADS, DNP., 2016) sobre el inventario de los gases de efecto invernadero para todo el territorio nacional, el cual presenta datos hasta el año 2012, para este año el sector forestal emitió 91,1 millones de toneladas de CO₂ equivalente, en este estudio se encontró que la deforestación entre los años 2014 y 2020 emitió un total de 7196483,1 t CO₂ equivalente, lo cual es corresponde a 1199413,85 t CO₂ equivalente por año; por lo tanto se encuentra que la deforestación en el municipio de Remedios emite el 1,2 % del CO₂ equivalente para todo el territorio nacional, tomando como base las emisiones realizadas para el año 2012.

Se comparan las áreas de bosque obtenidas para el municipio de Remedios mediante el método de Máxima Verosimilitud (MV) de manera anual, con las áreas reportadas por el IDEAM (IDEAM, 2019a), cuantificado actualmente hasta el año 2018 y con las áreas encontradas en el mapa de deforestación mundial de (Hansen et al., 2013), el cual se encuentra igualmente cuantificado hasta el año 2018.

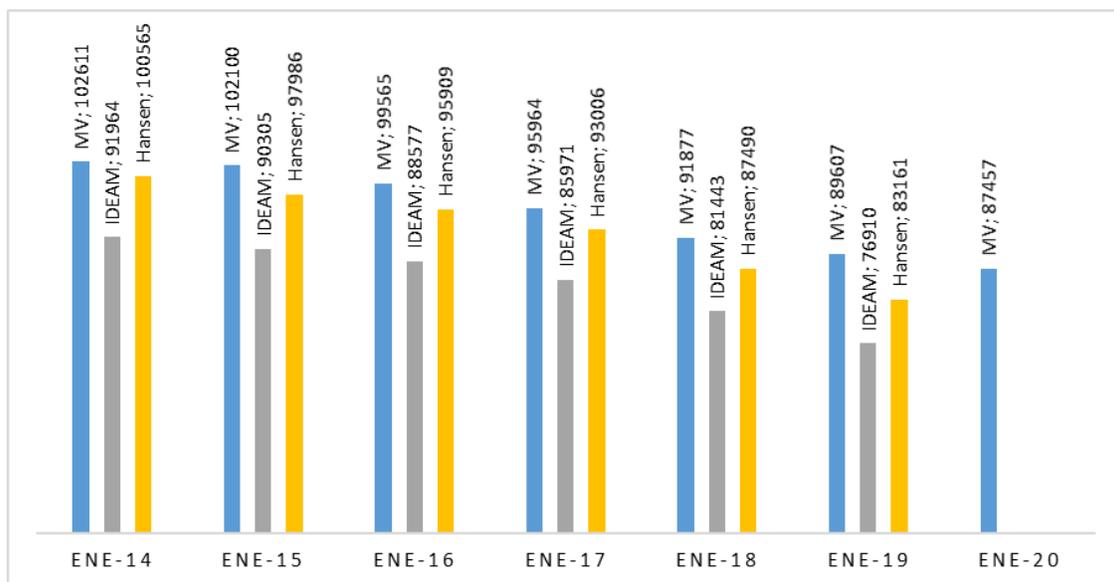


Figura 9. Comparativa anual de los diferentes resultados de bosque remanente para el municipio de Remedios entre el periodo de estudio.

Se evidencia como las áreas de bosque natural encontradas (remanente) para cada periodo de estudio mediante la clasificación supervisada, son superiores a las reportadas en el estudio de Hansen, y a su vez ambos estudios presentan mayores áreas a las áreas reportadas por el IDEAM.

Las áreas de bosque remanente encontradas en el presente estudio son en promedio 3.934 ha mayores a las áreas reportadas por Hansen, igualmente son en promedio 11.092 ha mayores a las reportadas por el IDEAM, las áreas reportadas por Hansen son en promedio 7.157 ha mayores a las reportadas por el IDEAM.

Conclusiones

Es posible determinar el cambio en el uso del suelo por deforestación de bosque natural a una escala de 1:20.000, identificada como pequeña escala, mediante el uso de imágenes satelitales determinando las áreas de bosque y no bosque por el método de clasificación supervisada utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud, y hacer comparativos en diferentes periodos de tiempo como mecanismo de monitoreo y gestión de procesos de deforestación.

Utilizando los scripts desarrollados para la plataforma de Google Earth Engine® es posible adquirir escenas satelitales de manera rápida y de acceso libre, y así se pueden realizar inferencias sobre el comportamiento de las tasas de deforestación para cualquier zona en particular y para varios periodos de análisis.

Las Imágenes de Landsat 8 y Sentinel 2 pueden ser utilizadas para este tipo de estudios, ya que la resolución espacial de estas permite separar de manera clara las áreas de bosque natural de otros usos, la metodología de clasificación supervisada mediante el método de máxima verosimilitud demostró generar resultados confiables mediante el método de validación utilizando la matriz de confusión y el índice de Kappa.

Se desarrolló un modelo de geoprocamiento que identificara las áreas deforestadas para una zona específica mediante el análisis de imágenes satelitales obtenidas de los programas Sentinel 2 y Landsat 8, estadísticamente el modelo desarrollado obtuvo resultados similares a los desarrollados por otros autores. Actualmente el método de clasificación supervisada más referenciado es el de Random Forest, el cual es un método que para su cálculo requiere una mayor capacidad de procesamiento y por ende un mayor coste computacional, por el método de Máxima Verosimilitud se obtienen excelentes resultados con sencillez de cálculo y utilizando una capacidad de procesamiento menor.

A partir de la plataforma Google Earth Engine es posible desarrollar un índice que permita identificar las talas de bosque natural mediante análisis multitemporal de dos imágenes satelitales casi en tiempo real, pero requiere de seguir desarrollando el método y conocimientos de programación en JavaScript.

Referencias

- Abburu, S., & Babu Golla, S. (2015). Satellite Image Classification Methods and Techniques: A Review. *International Journal of Computer Applications*, 119(8), 20–25. <https://doi.org/10.5120/21088-3779>
- Appiah Mensah, A., Akoto Sarfo, D., & Partey, S. T. (2019). Assessment of vegetation dynamics using remote sensing and GIS: A case of Bosomtwe Range Forest Reserve, Ghana. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(2), 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.04.004>
- Belgiu, M., & Drăgu, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2016.01.011>
- Chuvieco, E., & Huete, A. (2009). Fundamentals of satellite remote sensing. In *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1201/b18954>
- Fernández, T., Pérez-García, J. L., Gómez-López, J. M., Cardenal, J., Moya, F., Delgado, J., Bardi, F., Dotta, G., Martire, D. Di, Meng, Q., & Confuorto, P. (2011). Multitemporal Landslide Inventory and Activity Analysis by Means of Aerial Photogrammetry and LiDAR Techniques in an Area of Southern Spain. <https://doi.org/10.3390/rs13112110>
- Fitts, L. A., Russell, M. B., Domke, G. M., & Knight, J. K. (2021). Modeling Land use Change and Forest Carbon Stock Changes in Temperate Forests in the United States. *Carbon Balance and Management*, 16(20), 1–20. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00183-6>
- Fortin, J. A., Cardille, J. A., & Perez, E. (2020). Multi-sensor detection of forest-cover change across 45 years in Mato Grosso, Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 238(June), 111266. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111266>

García-Villalpando, J. A., Castillo-Morales, A., Ramírez-Guzmán, M. E., Rendón-Sánchez, G., & Larqué-Saavedra, M. U. (2001). Comparación de los procedimientos De Tukey, Duncan, Dunnett, Hsu y Bechhofer para selección de medias. *Agrociencia*, 35(2), 79–86.

García Romero, H. (2013). Deforestación en Colombia: Retos y perspectivas. *El Desafío Del Desarrollo Sustentable En América Latina*, 123–142. [http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/11445/337/3/KAS SOPLA_Deforestacion en Colombia retos y perspectivas.pdf](http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/11445/337/3/KAS%20SOPLA_Deforestacion%20en%20Colombia%20retos%20y%20perspectivas.pdf)

Gobernación de Antioquia. (2019). Información Geográfica. Web Oficial Catastro Departamental. https://catastro.antioquia.gov.co/web/guest/inicio?p_p_state=maximized&p_p_mode=view&saveLastPath=false&_58_struts_action=%2Flogin%2Flogin&p_p_id=58&p_p_lifecycle=0&_58_redirect=%2Fweb%2Fguest%2Fdescarga-geografica

Gomariz-Castillo, F., Alonso-Sarría, F., & Cánovas-García, F. (2014). Clasificación multitemporal de usos del suelo en la Cuenca del Río Vinalopó (Comunidad Valenciana) mediante diferentes algoritmos de clasificación supervisada y variables auxiliares. XVI Congreso Nacional de Tecnologías de La Información Geográfica.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>

Hernández Gomez, I. U., Ellis, Ed. A., & Gallo Gomez, C. A. (2013). Aplicación de teledetección y sistemas de información geográfica para el análisis de deforestación y deterioro de selvas tropicales en la región Uxpanapa, Veracruz. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 13, 1–24.

IDEAM. (2019a). Resultados de monitoreo deforestación 2019 [Deforestation monitoring results 2019] (p. 16). *Informes de deforestación Colombia*. [prehttp://www.andi.com.co/Uploads/PRESENTACION DEFORRESTACION 2019 \(julio 9\)_compressed.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/PRESENTACION%20DEFORRESTACION%202019%20(julio%209)_compressed.pdf)

IDEAM. (2019b). Resultados Monitoreo de la Deforestación. *Visión Amazonía*, 34. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A., & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.014>

Lange-Gonzalez, G. (2018). Análisis multitemporal de la deforestación y cambio de la cobertura del suelo de la ciudad de puerto ayora – santa cruz mediante el uso de la teledetección y sistemas de información geográfica [UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL]. In Tesis de grado. <https://doi.org/10.1007/s11431-009-0031-6>

- Liu, C., Li, W., Wang, W., Zhou, H., Liang, T., Hou, F., Xu, J., & Xue, P. (2021). Quantitative spatial analysis of vegetation dynamics and potential driving factors in a typical alpine region on the northeastern Tibetan Plateau using the Google Earth Engine. *Catena*, 206(April), 105500. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105500>
- Liu, W., Yang, J., Li, P., Han, Y., Zhao, J., & Shi, H. (2018). A novel object-based supervised classification method with active learning and random forest for PolSAR imagery. *Remote Sensing*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/rs10071092>
- Loza-Del-Carpio, A., & Taype-Huamán, I. (2021). Análisis multitemporal de asociaciones vegetales y cambios de uso del suelo en una localidad altoandina, Puno-Perú. *Uniciencia*, 35(2), 1–19. <https://doi.org/10.15359/ru.35-2.3>
- Meng, X., Gao, X., Li, S., Li, S., & Lei, J. (2021). Monitoring desertification in Mongolia based on Landsat images and Google Earth Engine from 1990 to 2020. *Ecological Indicators*, 129, 107908. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107908>
- Mihai, B., Săvulescu, I., Rujoiu-Mare, M., & Nistor, C. (2017). Recent forest cover changes (2002–2015) in the Southern Carpathians: A case study of the Iezer Mountains, Romania. *Science of the Total Environment*, 599–600, 2166–2174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.226>
- Minhoni, R. T. de A., Scudiero, E., Zaccaria, D., & Saad, J. C. C. (2021). Multitemporal satellite imagery analysis for soil organic carbon assessment in an agricultural farm in southeastern Brazil. *Science of the Total Environment*, 784, 147216. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147216>
- Municipio de Remedios. (1999). Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Remedios Antioquia (p. 194). Gaceta.
- Paul, F., Winsvold, S. H., Kääb, A., Nagler, T., & Schwaizer, G. (2016). Glacier remote sensing using Sentinel-2. part II: Mapping glacier extents and surface facies, and comparison to Landsat 8. *Remote Sensing*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/rs8070575>
- Rivas, C. A., Guerrero-Casado, J., & Navarro-Cerillo, R. M. (2021). Deforestation and fragmentation trends of seasonal dry tropical forest in Ecuador: impact on conservation. *Forest Ecosystems*, 8(46), 13. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00329-5>
- Ruiz, V., Savé, R., & Herrera Herrera, A. (2014). Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el Paisaje Terrestre Protegido Miraflores Moropotente Nicaragua, 1993 – 2011. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 22(11), 57–68. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i11.1605>
- Tahri, M., Kaspar, J., Vacik, H., & Marusak, Robert. (2021). Multi-attribute decision making and geographic information systems: potential tools for evaluating forest ecosystem services. *Annals of Forest Science*, 1, 3. <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01049-0>
- Velastegui-Montoya, A., De Lima, A., & Adami, M. (2020). Multitemporal analysis of deforestation in response to the construction of the tucuruí dam. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/ijgi9100583>

Veloza, J. (2017). Análisis multitemporal de las coberturas y usos del suelo de la reserva forestal protectora- productora “Casablanca” en Madrid Cundinamarca entre los años 1961 y 2015: aportes para el ordenamiento territorial municipal [UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS]. In Tesis de grado (Vol. 01). <http://www.albayan.ae>

Willington, E., Nolasco, M., & Bocco, M. (2013). Clasificación supervisada de suelos de uso agrícola en la zona central de Córdoba (Argentina): comparación de distintos algoritmos sobre imágenes Landsat. Congreso Argentino de AgroInformatica, CAI 2013, 207–216.

Wulder, M. A., & Coops, N. C. (2014). Satellites: Make Earth observations open access. *Nature*, 513(7516), 30–31. <https://doi.org/10.1038/513030a>

Yepes, A., Navarrete D.A., Phillips J.F., Duque, A.J., Cabrera, E., Galindo, G., Vargas, D., García, M. . Y. O., & M.F. (2011). Estimación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por deforestación durante el periodo 2005-2010 (IDEAM (ed.)).

Yin, H., Khamzina, A., Pflugmacher, D., & Martius, C. (2017). Forest cover mapping in post-Soviet Central Asia using multi-resolution remote sensing imagery. *Scientific Reports*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01582-x>