

Variación de la cobertura vegetal del Parque Nacional Machalilla mediante la evaluación de índices de vegetación en la provincia de Manabí

Vegetation cover changes in the Machalilla National Park through vegetation indices assessment in Manabi province

Marcelo Álvarez^{1*} & Vinicio Macas²

¹Consultor Ambiental Individual, Asesorías en Gestión Ambiental, Cda. Guayacanes II.
Tlf. 0959178381, Guayaquil, Ecuador

²Docente de la Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, Av. Raúl Gómez Lince s/n y Av. Juan Tanca Marengo, Guayaquil, Ecuador

Recibido 3 de agosto 2018; recibido en forma revisada 26 de agosto 2018, aceptado 3 de octubre 2018
Disponible en línea 20 de diciembre 2018

Resumen

El sector agrícola y la expansión urbana son amenazas para los bosques en el mundo (FAO, 2016), entre ellos, el Parque Nacional Machalilla (PNM en adelante). Esta área protegida se encuentra bajo la Categoría II de conservación (UICN, 2017) y protege uno de los ecosistemas más susceptibles del Ecuador, el bosque seco tropical (MAE, 2007). El objetivo principal de la investigación fue determinar la variación de la cobertura vegetal del PNM en un periodo de 30 años, para lo cual se utilizaron tres imágenes satelitales Landsat, ortofotografías e índices de vegetación con la finalidad de cuantificar la tasa de cambio para los periodos 1986-2000, 2000-2016 y 1986-2016. Además, se realizó la clasificación supervisada de imagen del año 2016 para fijar los valores umbrales de los índices, la cual contó con identificación y verificación de coberturas en campo. De los resultados obtenidos, se destaca que hubo una tasa anual de pérdida de vegetación natural de 195,28 ha en el PNM durante los últimos 30 años y que la mayoría de los cambios sucedieron en el periodo 1986-2000 con pérdidas de 181,20 ha/año, siendo el bosque seco más susceptible a pérdida de vegetación natural. Este análisis geoespacial permitió generar la cartografía de susceptibilidad a variación de cobertura vegetal del PNM, demostrando que el 73,82% de la pérdida de vegetación natural se concentra en zonas de muy alta y alta susceptibilidad, las cuales se encuentran cercanas a poblados y vías como el Valle de Buena Vista de la Comuna de Agua Blanca.

Palabra claves: cobertura, vegetación, cambio, susceptibilidad.

Abstract

Nowadays, farming and urban expansion threaten natural forests on the earth (FAO, 2016), for instance, the Machalilla National Park (MNP henceforth). This protected area is considered as Management Category II (UICN, 2017) and protects one the most sensitive ecosystems in Ecuador, tropical dry forest (MAE, 2017). The primary research aim was about to determine the vegetation cover change of the MNP in the latest 30 years. It was employed three Landsat satellite images, orthophotos and vegetation indexes to quantify rate changes in three periods 1986-2000, 2000-2016 and 1986-2016. Moreover, it was performed supervised land classification on 2016 image to set vegetation index thresholds, this operation needed to verify land covers in the study area. As a result, there has been decreased 195,28 ha annually of natural vegetation cover in the MNP within last 30 years, and mostly these changes happened in the 1986-2000 period showing 181,20 ha loss a year. Hence, the dry forest was much more susceptible. This geospatial analysis allowed to make a vegetation-cover change susceptibility map of the PNM, which let to know 73,82% natural vegetation loss is gathered within very high and high susceptibility zones, which are nearby roadways and villages such as Buena Vista Valley, Agua Blanca Commune.

Keywords: cover, vegetation, change, susceptibility.

* Correspondencia del autor:
E-mail: marceloap39@gmail.com



Introducción

La deforestación y la degradación de bosques influyen en el balance natural de los ecosistemas y generan fragmentación de áreas. A escala global en el periodo 2000-2010 se cuantificó 7 millones de hectáreas de pérdida neta de bosques por causales como agricultura, expansión urbana y minería (FAO, 2016). El Ecuador no se aleja de la realidad mundial debido a que en el periodo 1990-2008 hubo una reducción significativa de bosques de aproximadamente 83.000 hectáreas por año (Ministerio del Ambiente, 2012).

En la actualidad el apoyo provisto por tecnologías de información y comunicación a las geociencias es de gran importancia, debido al aporte que realiza la teledetección en el análisis y resolución de problemas ambientales. La teledetección involucra componentes tales como plataformas, sensores remotos, imágenes satelitales, sistemas de información geográfica, entre otros; y representa un recurso valioso para proponer soluciones en el campo de las ciencias ambientales. Las aplicaciones son variadas y entre ellas se tiene determinación de impactos ambientales causados por desastres naturales, estudios relacionados al cambio climático en la cuantificación de gases de efecto invernadero y pérdida de cobertura vegetal.

Las características de la respuesta espectral de la vegetación en los sensores remotos es una de labores más interesantes de la teledetección (Chuvieco, 2010). Estas sensibles respuestas permiten determinar vigorosidad y estado fenológico de las plantas, además de cuantificar porcentajes de cobertura vegetal en una zona o área determinada. A lo largo del tiempo y a través de la investigación científica en este campo se han generado varios índices de vegetación que representan el soporte fundamental para distinguir formaciones vegetales.

La radiación solar es aprovechada por las plantas para realizar la función de la fotosíntesis, parte de la radiación es absorbida y otra es reflejada a la atmósfera y al suelo. En específico, los pigmentos de la hoja cumplen dicha función en el espectro visible de los colores verde y rojo (0,5 - 0,7 μm) en donde la mayor absorción sucede en el espectro del rojo y el porcentaje de absorción es de clorofila 65%, xantofila 29% y caroteno 6%. En contraposición, los pigmentos muestran mayor reflectividad y menor absorción en el espectro del infrarrojo cercano (0,76 - 0,90 μm) (Chuvieco, 2010).

Estas respuestas espectrales de la vegetación han sido materia de estudio para la determinación de la vigorosidad de las plantas y la generación de índices de vegetación.

Por lo tanto, en esta investigación se evalúa el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales de sensores remotos Landsat en el intervalo de tiempo de 30 años (1986-2016), para determinar la variación de la cobertura vegetal del Parque Nacional Machalilla (PNM), en la Provincia de Manabí. La ejecución del estudio tiene tres motivos, primero aplicar los índices de vegetación, segundo cuantificar la tasa de cambio de masas vegetales en el intervalo de tiempo establecido, y finalmente zonificar la susceptibilidad de la vegetación a variaciones en el PNM, con la finalidad de proveer de un instrumento técnico de apoyo para el manejo y gestión del área protegida.

Materiales y Métodos

Datos e insumos

Imágenes satelitales

A través de solicitud realizada en el portal web <http://earthexplorer.usgs.gov> del Servicio Geológico de Estado Unidos se obtuvieron las imágenes satelitales necesarias para la presente investigación. Fueron seleccionadas tres imágenes, las cuales comprenden un periodo de tiempo de 30 años, las mismas que presentan bajo porcentaje de nubosidad y corresponden a la estación seca, es decir aquellas capturadas en meses con escasos o nulos valores de precipitación en la zona de estudio. Por lo tanto, se tiene una imagen en un intervalo cercano a quince años 1986, 2000 y 2016. La razón por la cual se eligió el año 1986 como fecha de partida se debe a que es la mejor imagen disponible en el sitio web (bajo porcentaje de nubosidad) y es una fecha cercana a la creación del PNM.

Cada imagen cubre una extensión territorial aproximadamente de 34500 Km² (190 x 182 km), la cual está identificada en una columna (path) y una fila (row). Las bandas del espectro visible e infrarrojos tienen una resolución espacial de 30 metros y la banda del pancromático es de 15 metros. A continuación, en la Tabla 1 se detalla la fecha, el satélite de origen, resolución espacial, cobertura de nubes, época y path/row de los sensores Landsat.

Tabla 1. Datos importantes de las imágenes satelitales

SENSOR REMOTO	WRS PATH/ROW	FECHA	ÉPOCA	RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)	NUBOSIDAD (%)
L5 TM	011/061	SEP/06/1986	SECA	30	20
L7 ETM+	011/061	NOV/23/2000	SECA	30	2
L8 OLI/TIRS	011/061	NOV/27/2016	SECA	30	9

Ortofotografías del PNM

Además de las imágenes satelitales se recopilieron ortofotografías del área de estudio. En efecto se procedió a través de solicitudes en el portal web SINAT <http://servicios.sigtierras.gob.ec> del Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS), servicio que es provisto por el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador. Estos datos son necesarios con la finalidad de corroborar la información obtenida en la clasificación de imágenes. Estas imágenes tienen resolución espacial de 0,4 metros, 4 bandas disponibles de resolución espectral y fueron adquiridas entre 2010 y 2011.

Softwares y equipos

En lo que respecta a los programas informáticos para el desarrollo de lo propuesto se utilizaron tres softwares específicos. Para tareas de pre procesamiento como correcciones atmosférica y geométrica y clasificación de imágenes se usó el software ENVI 5.3, por el motivo que es un programa diseñado para el procesamiento digital de imágenes. Para el cálculo de índices de vegetación se usó el software libre QuantunGis 2.18. Finalmente, para la elaboración de cartografía resultante se usó el programa ArcGIS 10.3.

Para el levantamiento de información preliminar y de validación en campo se utilizó un dispositivo GPS navegador Garmin eTrex 20, el cual es de alta precisión y tiene muy buena recepción de señal. Además, se hizo uso de una cámara fotográfica de alta resolución de 20 megapíxeles para tomar fotografías durante las salidas de campo en el Parque Nacional Machalilla.

Pre procesamiento de datos

Corrección geométrica

El portal web EarthExplorer pone a disposición un conjunto de imágenes satelitales corregidas geométricamente y topográficamente con alto nivel de precisión (USGS, 2017), conocido como Landsat Collection 1 Level-1, esto garantiza la superposición pixel a pixel de las imágenes adquiridas y evita errores que puedan ser causados por una georreferenciación incorrecta. Por esta razón no fue necesario realizar este tipo de corrección a las imágenes a través de los programas informáticos descritos anteriormente. Adicionalmente, Chuvieco (2010) menciona que es fundamental realizar el ajuste geométrico previo a la clasificación de imágenes por la razón de evitar errores mayores al 10% al momento de identificar cambios entre las fechas seleccionadas del área de estudio.

Corrección atmosférica

Este tipo de corrección está enfocada a convertir los niveles digitales a valores de radiancia y luego a reflectancia, es decir en unidades físicas $Watt/m^2 \cdot sr \cdot nm$. Para lo cual se usa las herramientas del programa informático ENVI 5.3. En primer lugar,

a través del módulo Radiometric Calibration se convierten los valores digitales a valores de radiancia. Luego se usa FLAASH Atmospheric Correction para obtener valores en reflectancia. Finalmente, estos últimos valores son escalados a valores de 0 y 1 a través de una expresión matemática utilizando la herramienta Band Math.

Levantamiento de información

Durante los días 19 y 20 de agosto de 2017 se hizo la visita de campo en el área de estudio, la cual permitió fotografiar los paisajes del PNM y registrar mediante el GPS las coordenadas en coberturas identificables en el área de estudio. En total se registraron 21 puntos que corresponden a 10 coberturas.

El criterio técnico utilizado para la selección de coberturas presentes en el Parque Nacional Machalilla en primera instancia está basado en el Protocolo Metodológico para la Elaboración del Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra del Ecuador Continental 2013-2014, elaborado por el MAE y MAGAP, el cual sugiere el uso de leyenda temática adaptada para el país en función de lo sugerido por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). Debido al uso de imágenes satelitales con resolución espacial de 30 metros, la leyenda temática seleccionada corresponde a niveles de detalle de Nivel I y Nivel II.

Clasificación de imágenes

La clasificación de imágenes se divide en dos fases. En primer lugar, corresponde a la asignación de áreas de entrenamiento, también conocido como ROIs, que no es más que la agrupación de píxeles dentro de una misma clase en función de sus características espectrales. Y el segundo paso es la creación de áreas de verificación, las cuales representan a aquellos píxeles que son validados en campo y pertenecen a esa misma clase. Por lo tanto, este segundo paso es fundamental para proveer a la clasificación objetividad y confiabilidad, que paralelamente se verifica a través de estadísticos como las matrices de confusión y los resultados del coeficiente Kappa. Luego de que la clasificación es validada y aceptada se procede a aplicar filtros modales con la finalidad de dar un mejoramiento visual a la imagen o nuevo ráster resultante.

Durante la fase de asignación de áreas de entrenamiento se hizo uso de la combinación de bandas de la imagen multispectral del año 2016 (Satélite Landsat 8), con la finalidad de distinguir visualmente los píxeles y asignarlos a la clase que le corresponde. Ciertas combinaciones permiten distinguir favorablemente píxeles que representan vegetación como la combinación RGB de las bandas 6, 5 y 4. Así mismo otras distinguen suelo desnudo y áreas urbanizadas como las combinaciones 5-6-4 y 7-6-4, respectivamente.

Clases y áreas de entrenamiento

A través de los criterios citados anteriormente y la visita de campo previa se han definido diez clases

del área de estudio. Estas coberturas corresponden a Bosque Húmedo, Bosque Seco, Matorral, Matorral seco, Zona Agropecuaria, Zona Antrópica, Suelo, Agua, Nubes y Sombras. A partir de estas clases son definidas las áreas de entrenamiento mediante el análisis visual de combinación de bandas y umbrales de índices de vegetación.

Análisis de separabilidad espectral

Luego de tener definidas las clases y seleccionados los ROIs de entrenamiento se procede a ejecutar la herramienta Compute ROI Separability del software ENVI 5.3, con la finalidad de conocer preliminarmente que las áreas de entrenamiento han sido bien seleccionadas. Una buena separabilidad espectral entre dos clases debe ser mayor a 1.60, sabiendo que a aquella que se acerque a 2.0 es excelente. Este paso preliminar a la validación de la clasificación permite verificar si las firmas espectrales de las clases se separan bien o por el contrario se confunden demasiado, lo cual permite tomar decisiones para realizar ajustes en las áreas de entrenamiento o fusionar clases.

Clasificador de Máxima Verosimilitud

Como se indicó en el capítulo anterior el clasificador de máxima verosimilitud es el más usado para la clasificación de imágenes por ser un método más confiable y generar resultados óptimos. El módulo de clasificación supervisada de ENVI contiene la herramienta Maximum Likelihood Classification, la cual toma como referencia las áreas de entrenamiento para la elaboración del ráster clasificado.

Áreas de verificación y validación de la clasificación

Teniendo como base el ráster resultante de la clasificación realizada a la imagen del año 2016, se procede a levantar información en campo para la validación de clasificación a través de la selección de áreas de verificación. Durante el 11 y 12 de noviembre se realizó la segunda visita en el área de estudio, en la cual se establecieron 4 puntos de control por cada clase. Luego en gabinete se valida la clasificación haciendo uso de la matriz de confusión, para lo cual se ejecuta la herramienta Confusion Matriz Using Grand Truth ROIs. Esta herramienta elabora la matriz para el ráster clasificado que involucra los píxeles de las áreas de entrenamiento y los píxeles de áreas de verificación, que a su vez muestra la precisión del usuario y del productor, errores de omisión y comisión, la precisión global de la clasificación y el coeficiente Kappa resultante (Tabla 2). El coeficiente Kappa determina el nivel de concordancia entre los píxeles de entrenamiento y los píxeles de validación, esta

Tabla 2. Interpretación cualitativa de resultados del Coeficiente Kappa

<i>Rango</i>	<i>Interpretación</i>
Débil	Menor a 0.40
Moderada	0.41 - 0.60
Buena	0.61 - 0.80
Muy buena	Mayor a 0.81

Fuente: (Landis & Koch, 1977)

fuerza de concordancia tiene rangos de interpretación cualitativa.

Cálculo de Índices de Vegetación

Para efectos de estudio se calculan dos índices de vegetación el Índice de Vegetación Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Mejorada (EVI). En consecuencia, las tres imágenes pre tratadas y delimitadas por el polígono del PNM son sometidas al cálculo de los índices a través del módulo Calculadora Ráster del software QGis con sus respectivas ecuaciones. Del resultado de esta operación se obtienen dos rásters de índices de vegetación por cada imagen.

De los resultados obtenido de la operación aritmética se obtienen rásters que presentan valores entre -1 y +1, los cuales deben ser reclasificados en función de los respectivos umbrales para cada índice de vegetación. En el caso del NDVI los valores umbrales de vegetación según Ahmed & Akter (2017) típicamente se sitúan desde 0.2 a 1, cobertura vegetal densa y en buen estado se localiza por encima de 0.6, valores inferiores a 0 corresponden a cuerpos de agua y valores entre 0 a 0.09-0.1 se relacionan a píxeles de nubes y sombras.

Kong (2014) sugiere los siguientes valores umbrales para el índice de vegetación EVI: píxeles menores a 0.1 se considera cuerpos de agua, el umbral de 0.1001 a 0.3 es suelo desnudo, píxeles que se encuentre entre 0.3001 a 0.6 corresponden a cobertura herbácea y finalmente píxeles con valores del índice mayor 0.6001 están relacionados a cobertura boscosa.

Los valores umbrales de cada índice de vegetación fueron fijados en función de la imagen clasificada del año 2016 utilizando el método de máximo verosimilitud. Este paso fue de gran ayuda para reclasificar las imágenes correspondientes a los años 1986 y 2000 utilizando los valores umbrales de los índices adaptados al área de estudio.

Validación mediante Reglas Topológicas

En el post procesamiento se debe convertir los rásters a formato vectorial, es recomendable realizar validaciones topológicas para evitar errores geométricos de superposición y/o vacíos entre polígonos. La validación topológica requiere la creación de una, en la cual se van a importar las capas vectoriales convertidas correspondiente a los tres años de análisis. A continuación, se crean dos reglas topológicas por capa vectorial con la finalidad de verificar errores en los polígonos y de corregir dichos errores en cada capa vectorial; las reglas topológicas seleccionadas son que “no exista superposición de polígonos” y que “no existan espacios vacíos entre ellos”.

Obtención de la tasa de cambio

Matriz de Transición

En la obtención de la tasa de cambio se requiere generar una matriz de transición para conocer cómo

han sucedidos los cambios entre el intervalo 2016-2000, 2000-1986 y 2016-1986, los cambios pueden ser de índole positivo y negativo. Los rásters clasificados se convierten a formato vectorial para poder realizar el análisis de superposición de polígonos.

Gradiente de cambio

En función de los cambios detectados de las diferentes fechas seleccionadas para estudio se procede a determinar el gradiente de cambio entre dos fechas o áreas. Para lo cual se emplea la ecuación de gradiente, que se expresa en porcentajes, el cual podría contribuir a dar resultados positivos y negativos de cambio.

$$\text{Gradiente de cambio} = \frac{A_2 - A_1}{A_1} * 100$$

Elaboración de cartografía de Uso de Suelo

El diseño de mapas resultantes se elabora en el programa informático ArcGIS 10.3 por su versatilidad de herramientas de geoprocésamiento y múltiples opciones para la confección y diseño de cartografía temática. Cada mapa resultante incluye las coberturas o clases obtenidas, la imagen satelital del año correspondiente y diferentes capas vectoriales de líneas, puntos y polígonos del Sistema Nacional de Información. La escala gráfica de trabajo máxima considerada está en función de la unidad mínima cartografiable (Knight & Lunetta, 2003), es decir el tamaño del píxel en formato Ráster que según la resolución espacial para los satélites Landsat es 30 metros. Para lo cual se usa la siguiente ecuación escala de mapa.

$$\text{Escala de mapa} = \text{Resolución del Raster (m)} * 1000 * 2$$

La escala gráfica máxima considerada para la elaboración de mapas es de 1:60.000, es decir 1 cm en el papel representa 600 m en el terreno. Por otro lado, la escala de impresión de los mapas resultantes se ajusta al tamaño de papel A4 que de manera conveniente es 1:150.000.

Elaboración de cartografía temática Susceptibilidad a Variación de la Cobertura Vegetal

El mapa resultante de la presente investigación es originado de acuerdo a la susceptibilidad de la cobertura vegetal de modificar su composición y superficie con relación a la distancia próxima de zonas pobladas y vías de transporte terrestre. Estas superficies son obtenidas mediante análisis de ponderación multicriterio y el cálculo de distancias mediante la herramienta distancia euclidiana. El resultado obtenido se representan un único mapa zonificado de susceptibilidad que contendrán los cambios en el uso de suelo que han sucedido por actividad antrópica a lo largo del periodo de 30 años en el Parque Nacional Machalilla. Las áreas para la representación de esta cartografía llevan una leyenda con categorías de mayor a menor susceptibilidad, estas son “muy alta”, “alta”, “media”, “baja” y “nula”.

Resultados

Luego de haber realizado la clasificación de imágenes a través del método de máxima verosimilitud, se procede a validar estadísticamente los resultados, lo cual corrobora la coincidencia de píxeles de áreas de entrenamiento y de verificación. En esta clasificación se obtuvo un total de 11084 píxeles, de los cuales 10798 fueron bien clasificados en sus clases respectivas dando una precisión global de clasificación de 97,42 % (Tabla 3). Según lo que se evidencian en las tablas 3 y 4 las clases que mejor se clasificaron fueron Agua, Bosque Húmedo, Sombras y Nubes; por el contrario, existió menor separabilidad espectral entre las clases Suelo, Zona Antrópica y Zona Agropecuaria por lo cual la precisión en estas clases disminuyó.

Matriz de confusión

Errores, precisión y Coeficiente Kappa

En materia de clasificación de imágenes es también importante considerar los errores de omisión y comisión, y la precisión del usuario y la del productor (Tabla 5).

Tabla 3. Matriz de Confusión de Clasificación Supervisada de Máxima Verosimilitud para el Año 2016 (píxeles)

CLASE	Píxeles validados										
	Agua	Suelo	Z. Antrópica	Z. Agropecuaria	Matorral Seco	Matorral	Bosque Seco	Bosque Húmedo	Nubes	Sombras	TOTAL
Agua	7996	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7996
Suelo	0	71	53	0	0	0	0	0	0	0	124
Z. Antrópica	0	15	168	5	5	0	0	0	0	0	193
Z. Agropecuaria	0	12	24	76	1	0	0	0	0	0	113
Matorral Seco	0	15	10	2	221	52	0	0	0	0	300
Matorral	0	0	0	0	0	174	15	0	0	0	189
Bosque Seco	0	2	13	38	0	22	1121	0	0	0	1196
Bosque Húmedo	0	0	1	0	0	0	1	927	0	0	929
Nubes	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	19
Sombras	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	25
TOTAL	7996	115	269	121	227	248	1137	927	19	25	10798

Tabla 4. Matriz de Confusión de Clasificación Supervisada de Máxima Verosimilitud para el Año 2016 (porcentaje)

CLASE	Píxeles validados (Porcentaje)										
	Agua	Suelo	Z. Antrópica	Z. Agropecuaria	Matorral Seco	Matorral	Bosque Seco	Bosque Húmedo	Nubes	Sombras	
Agua	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Suelo	0,00	61,74	19,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Z. Antrópica	0,00	13,04	62,45	4,13	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Z. Agropecuaria	0,00	10,43	8,92	62,81	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Matorral Seco	0,00	13,04	3,72	1,65	97,36	20,97	0,00	0,00	0,00	0,00	
Matorral	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,16	1,32	0,00	0,00	0,00	
Bosque Seco	0,00	1,74	4,83	31,40	0,00	8,87	98,59	0,00	0,00	0,00	
Bosque Húmedo	0,00	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,09	100,00	0,00	0,00	
Nubes	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	
Sombras	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
TOTAL	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

La imagen clasificada correspondiente al año 2016 indica que mayores errores de comisión sucedieron en las clases Suelo, Zona Antrópica y Zona Agropecuaria con alrededor del 38% de sus píxeles (Tabla 6). Mientras que errores de omisión presentan menor porcentaje de píxeles para Zona Antrópica y Zona Agropecuaria, 12,95 % y 32,74% respectivamente. La precisión del usuario y del productor es satisfactoria debido a que demuestra que los píxeles se asignaron en su clase correspondiente cerca al 60% en todas sus clases (Tabla 7). Clases como Bosque, Húmedo, Bosque Seco, Matorral, Matorral Seco y Agua presentaron valores de precisión por encima del 70%. Por otra parte, el coeficiente Kappa obtenido en la presente investigación es satisfactorio 0.94, lo cual indican un alto grado de concordancia entre los ROIs

Valor obtenido del Coeficiente Kappa

$$K = \frac{p_c - p_a}{1 - p_a} = 0,94$$

de entrenamiento y ROIs de verificación.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI)

Luego de haber aplicado la relación aritmética entre las bandas del Rojo y el Infrarrojo cercano de las

imágenes multispectrales de los satélites Landsat, dio como resultado el índice de vegetación para el área de estudio. Los cuales fueron tomado como base para reclasificar la imagen de los años 2000 y 1986. Los valores varían entre imagen e imagen, el valor mínimo de -0,43 corresponde a los rásters de 2016 y 1986, mientras que el máximo 1,00 corresponde al ráster del año 2000. Se agregó una cuarta imagen que incluye sus respectivos niveles digitales de NDVI, la cual corresponde al año 2008 y presenta valores mínimos de -0,60 y máximos de 0,87.

La imagen que corresponde al año 2008 fue añadida para comparar de manera visual los cambios ocurridos en intervalos de 8 a 16 años de la vegetación natural en sectores como Río de Plátano (Figura 1) y Comuna de Agua Blanca (Figura 2). En estas figuras se visualiza niveles digitales de NDVI en escala de grises, los tonos más claros indican alto índice de vegetación que se asocian a pigmentación y abundancia de especies vegetales, mientras que tonos oscuros indican bajo índice, lo cual está asociado a vegetación en senescencia o ausencia de cobertura vegetal.

Coberturas de Vegetación y Uso de Suelo

A través de la clasificación de imagen y reclasificación de índices de vegetación se obtuvieron las capas vectoriales para cada año seleccionado de esta

Tabla 5. Precisión global de la clasificación

CLASE	Píxeles clasificados	Píxeles validados	Porcentaje
Agua	7996	7996	100,00
Suelo	115	71	61,74
Zona Antrópica	269	168	62,45
Zona Agropecuaria	121	76	62,81
Matorral Seco	227	221	97,36
Matorral	248	174	70,16
Bosque Seco	1137	1121	98,59
Bosque Húmedo	927	927	100,00
Nubes	19	19	100,00
Sombras	25	25	100,00
TOTAL	11084	10798	97,42

Tabla 6. Errores resultantes de la clasificación para el año 2016

CLASE	Errores			
	Comisión	Porcentaje	Omisión	Porcentaje
Agua	0/7996	0,00	0/7996	0,00
Suelo	44/115	38,26	53/124	42,74
Zona Antrópica	101/269	37,55	25/193	12,95
Zona Agropecuaria	45/121	37,19	37/113	32,74
Matorral Seco	6/227	2,64	79/300	26,33
Matorral	74/248	29,84	15/189	7,94
Bosque Seco	16/1137	1,41	75/1196	6,27
Bosque Húmedo	0/927	0,00	2/929	0,22
Nubes	0/19	0,00	0/19	0,00
Sombras	0/25	0,00	0/25	0,00

Tabla 7. Precisión obtenida de la clasificación para el año 2016

CLASE	Precisión			
	Productor	Porcentaje	Usuario	Porcentaje
Agua	7996/7996	100,00	7996/7996	100,00
Suelo	71/124	57,26	71/115	61,74
Zona Antrópica	168/193	87,05	168/269	62,45
Zona Agropecuaria	76/113	67,26	76/121	62,81
Matorral Seco	221/300	73,67	221/227	97,36
Matorral	174/189	92,06	174/248	70,16
Bosque Seco	1121/1196	93,73	1121/1137	98,59
Bosque Húmedo	927/929	99,78	927/927	100,00
Nubes	19/19	100,00	19/19	100,00
Sombras	25/25	100,00	25/25	100,00

Tabla 8. Superficies por cada clase para los años 1986, 2000, 2016 del PNM

Clase	1986		2000		2016	
	(ha)	%	(ha)	%	(ha)	%
Agua	1105,59	2,65	1130,63	2,71	1087,45	2,60
Suelo	153,54	0,37	146,94	0,35	184,73	0,44
Zona Antrópica	491,32	1,18	166,64	0,40	193,89	0,46
Zona Agropecuaria	1323,77	3,17	509,25	1,22	621,63	1,49
Matorral Seco	4928,04	11,80	2474,67	5,93	4065,28	9,74
Matorral	14859,19	35,59	11163,53	26,74	18151,42	43,47
Bosque Seco	10643,06	25,49	15475,35	37,06	7930,54	18,99
Bosque Húmedo	7857,84	18,82	10295,34	24,66	9127,41	21,86
No considerado	391,65	0,94	391,65	0,94	391,65	0,94
TOTAL	41754,00	100,00	41754,00	100,00	41754,00	100,00

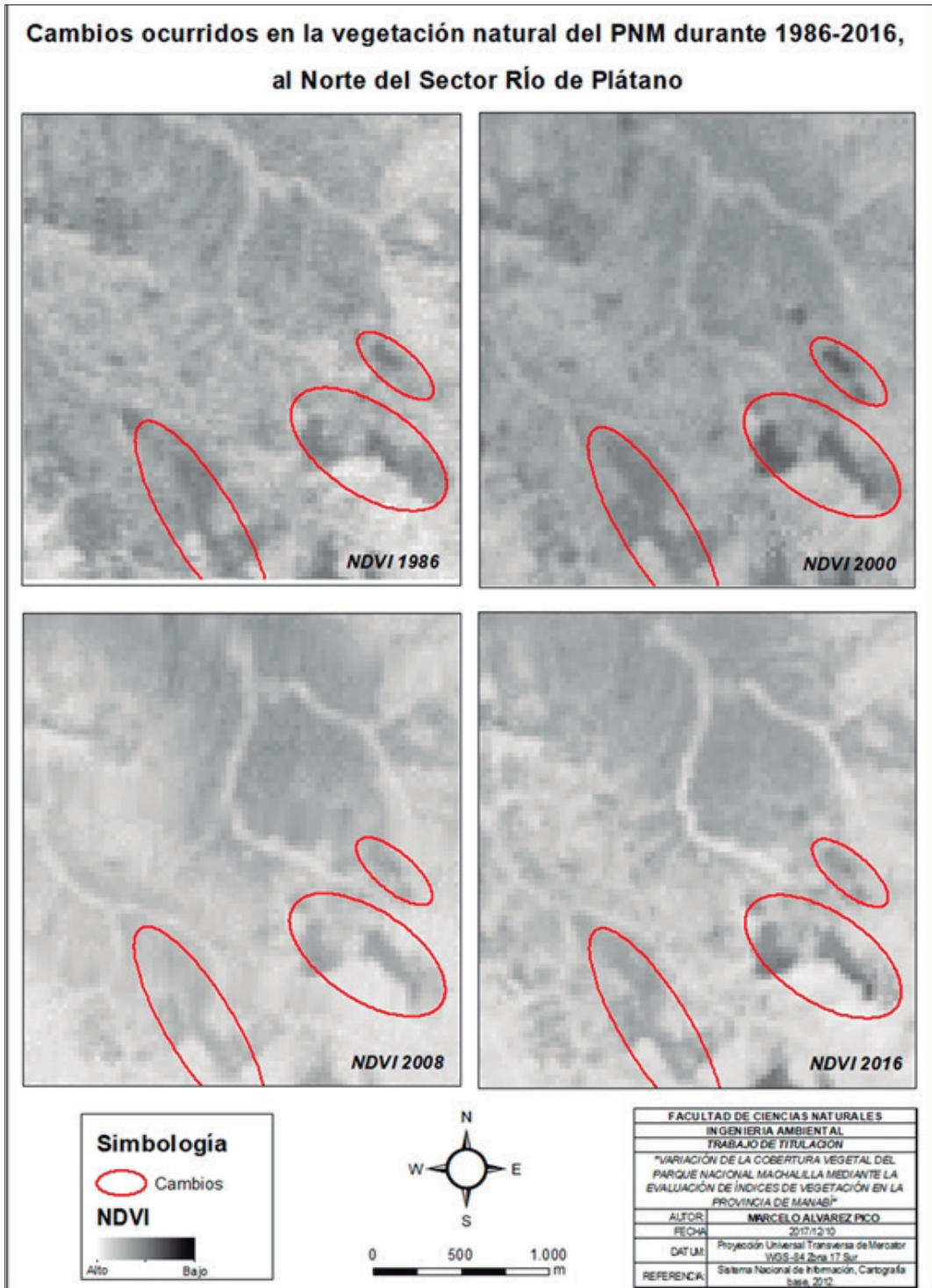


Figura 1. Cambios suscitados en la vegetación natural del PNM, al Norte de Río de Plátano.

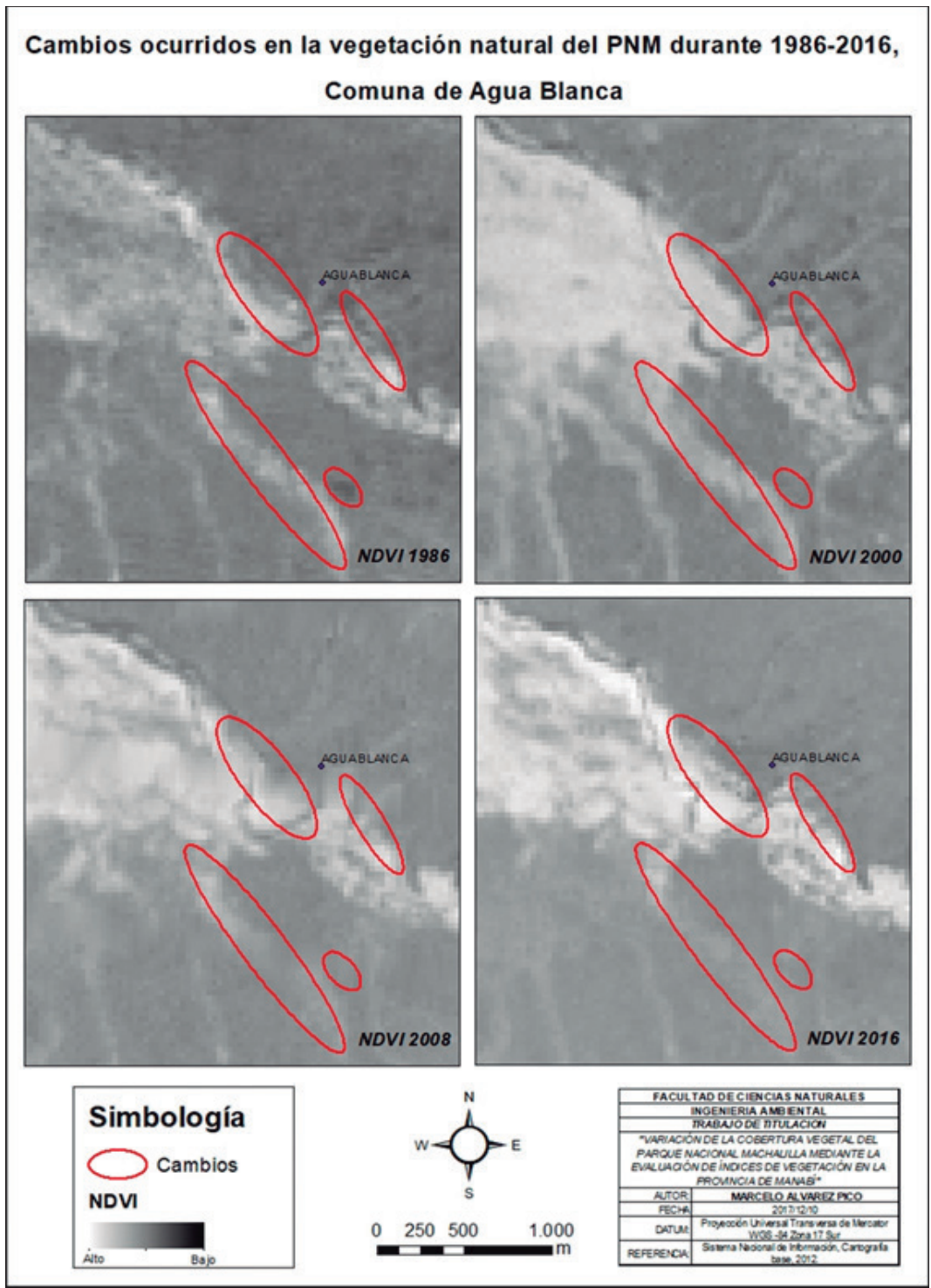


Figura 2. Cambios suscitados en la vegetación natural del PNM, Comuna de Agua Blanca.

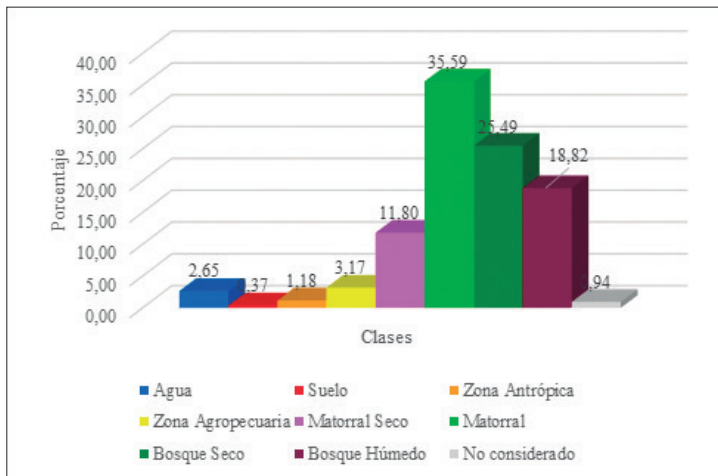


Figura 3. Coberturas del PNM para el año 1986.

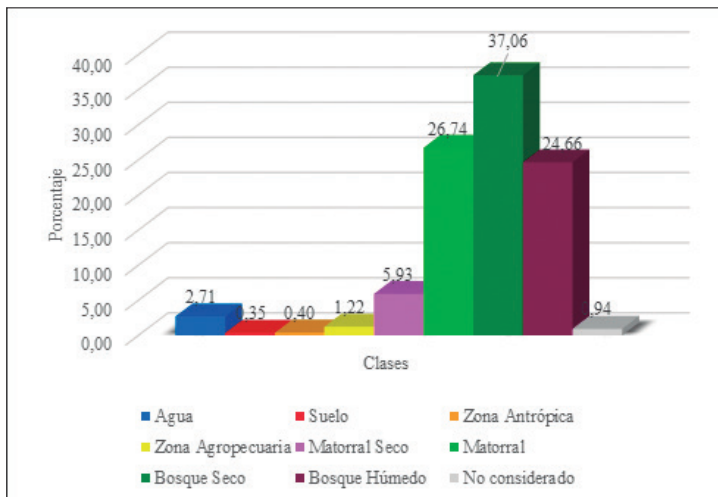


Figura 4. Coberturas del PNM para el año 2000.

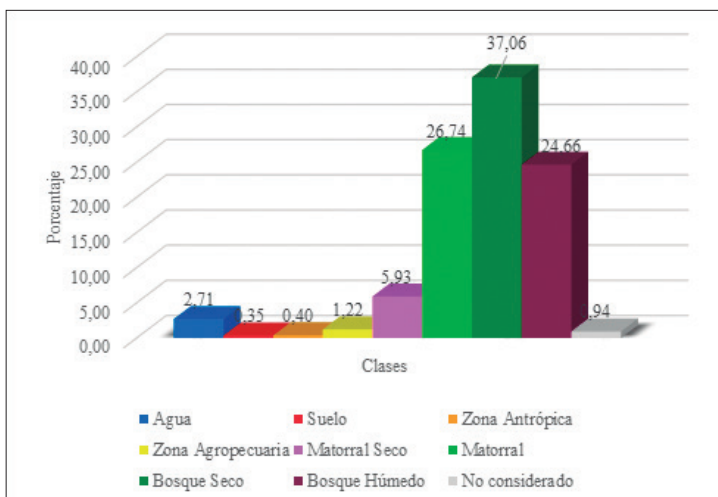


Figura 5. Coberturas del PNM para el año 2016.

presente investigación. La Tabla 8 y 9 detallan la extensión territorial y sus porcentajes de las coberturas y la cartografía resultante de cada año.

Del año 1986 (Figura 3), las clases con mayor porcentaje de superficie del PNM corresponden a Matorral y Bosque Seco con 35,59% y 25,49% respectivamente. Mientras que las clases de Suelo, Zona Antrópica y Zona Agropecuaria (zonas intervenidas) juntas suman cerca del 4,71%, que representan 11968 ha. El Bosque Húmedo para el año en mención se extendía alrededor de 7857 ha, es decir el 18,8% del área protegida, la mayoría situado sobre los 400 msnm.

Del año 2000, los resultados obtenidos guardan concordancia con lo analizado en las imágenes satelitales del programa Landsat, lo cual se evidencia en la figura 4, que las coberturas de Bosque Seco y Bosque Húmedo ganaron terreno situándose en 37,06% y 24,66%, respectivamente. Mientras que aquellas coberturas de zonas intervenidas juntas decrecieron 2,74 hectáreas del total del área del PNM, lo que representa 1144 ha, de las cuales solo 509,25 ha corresponden a zonas agropecuarias.

Particularmente para la fecha más reciente, 2016 (Figura 5), se hallaron datos interesantes. El Bosque Seco muestra menor superficie de terreno con alrededor del 18,9% del área, el Bosque Húmedo se situó sobre un 21,8%, mientras que coberturas como el Matorral Seco y Matorral aumentó significativamente sus coberturas mostrando 9,7% y 43,4%, respectivamente.

Por su parte, las coberturas definidas como zonas intervenidas aumentaron su superficie ligeramente desde el 2000, resultando ser juntas cerca de 2,4%, lo que representa 1000 ha aproximadamente que dejaron de ser vegetación natural. Se evidencia que los cambios han sucedido paulatinamente producto de asentamientos humanos y el avance de la frontera agrícola al interior del PNM.

Mediante el uso de gráficos de línea de tiempo, se puede evidenciar las variaciones que han sucedidos de las coberturas del PNM durante los últimos 30 años. En la figura 8 se aprecia que la tendencia de las coberturas vegetación natural es diferente. Las clases boscosas se comparten similar (Bosque Seco y Bosque Húmedo), mientras que las coberturas arbustivas tienen comportamiento parecido entre ellas y distintas del bosque.

De la figura 9, se aprecia que para las tres clases suelo, zona antrópica y zona agropecuaria existe un punto de inflexión en el año 2000, es decir que estas coberturas decrecieron en el tiempo durante 14 años, y luego de aquello se han mantenido hasta la actualidad, a excepción de las zonas agropecuarias que tuvieron un ligero incremento en el 2016.

Gradiente de Cambio

Para el intervalo de 1986-2000, la cobertura que más presentó variaciones negativas fueron Matorral

y Matorral Seco. Mientras las que presentaron variaciones de ganancia fueron Bosque Seco y Bosque Húmedo. Se evidencia que aquellas coberturas de origen antropogénico decrecieron 81,8 ha por año para este periodo.

En el intervalo 2000-2016, decrecieron las coberturas boscosas, el decrecimiento más significativo sucedió en el Bosque Seco alrededor de 18%. Es notorio que según los datos señalados en la Tabla 9 hubo un incremento de coberturas antrópicas y agropecuaria, generando alrededor de 11 ha/año durante los últimos 16 años.

En el intervalo 1986-2016, el periodo más extenso de este estudio, se evidencia que las ganancias y pérdidas se compensan entre los periodos 1986-2000 y 2000-2016. Coincidentemente, existe un retroceso de la frontera agrícola de alrededor de 23,4 ha/año y 9,9 ha/año para la clase zona antrópica. Es importante mencionar que, a pesar de las deforestaciones ocurridas en el pasado las tasas de cambio favorable para la vegetación natural son mayor que aquellas desfavorables.

Matriz de Transición

A través de uso de matrices de transición se puede evidenciar el cambio específico sucedido en el tiempo y determinar la superficie de cambio entre coberturas, lo cual está relacionado con las tasas de cambio.

Susceptibilidad a Variación de la Cobertura Vegetal

De acuerdo a la transición entre 1986 y 2016, para la cobertura Matorral Seco, se evidencia que el cambio más significativo fue que 144,75 ha se convirtieron en zona agropecuaria. 171,25 hectáreas dejaron de ser matorral y pasaron a ser zona de cultivos. El bosque seco también cambió, pero en menor proporción, 22,68 ha se convirtieron en zona antrópica y 23.33 ha a zona agropecuaria.

La cobertura que más conservó su superficie fue el Bosque Húmedo (91,60 %). A través de este análisis se indica que en total se perdieron 505,1 ha de vegetación natural durante los últimos 30 años en el PNM.

Además, se aprecia que 3768 ha dejaron de ser cobertura boscosa y ahora representan cobertura arbustiva, la mayoría se ubican en zonas de alta y muy alta susceptibilidad a variación de la cobertura vegetal.

Finalmente, a través de las técnicas de teledetección utilizadas y los análisis realizados hasta ahora se procede a generar la cartografía de susceptibilidad a variación de la cobertura vegetal del PNM.

Durante los últimos 30 años hubo una pérdida neta de cobertura vegetal de 505,1 ha, las cuales se convirtieron en zonas destinadas para cultivo y ganado, zonas de asentamientos humanos y aquellas áreas que se deforestaron pasando a ser suelo desprotegido

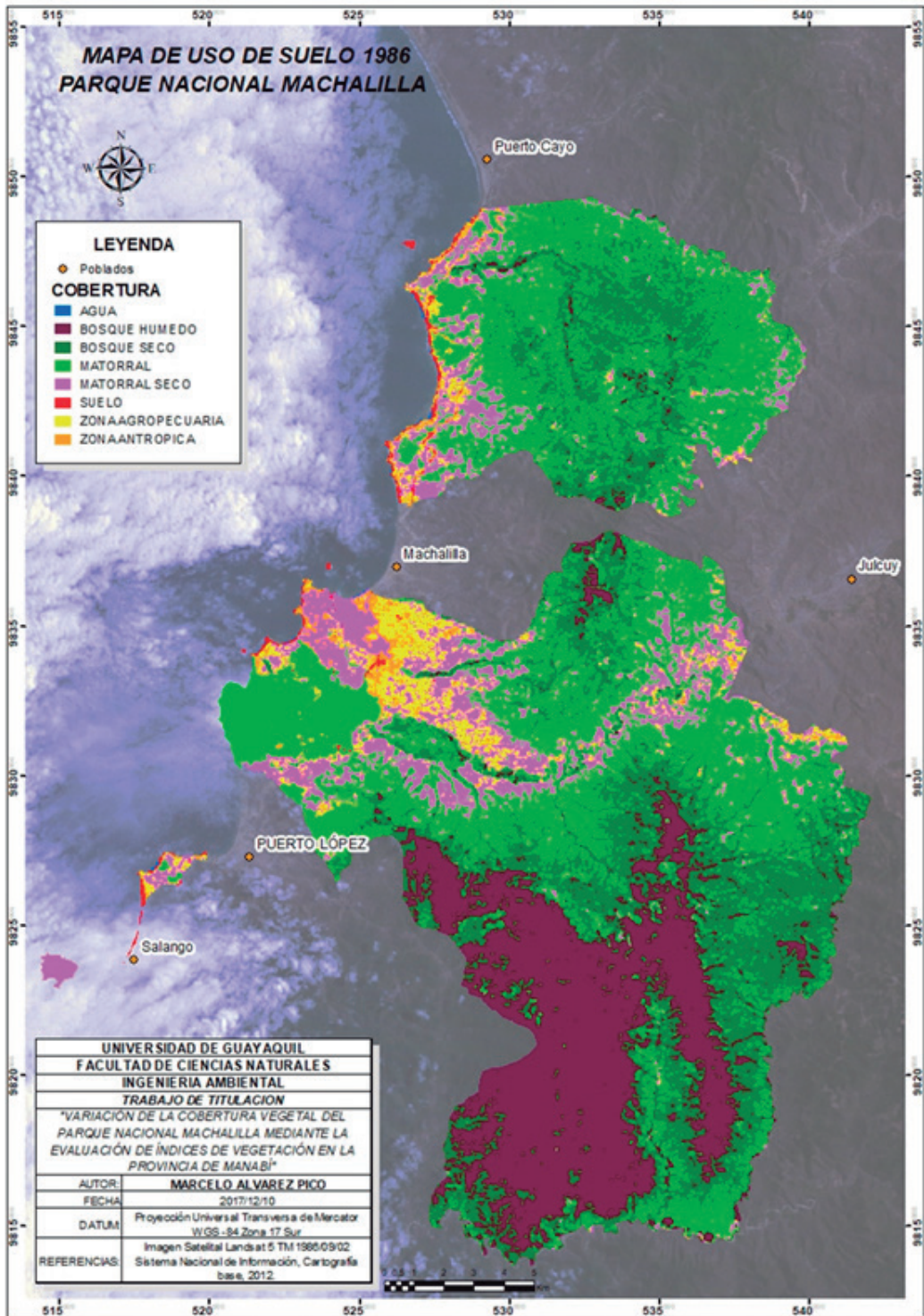


Figura 6. Clasificación de cobertura vegetal y uso de suelo 1986 del PNM a partir del NDVI.

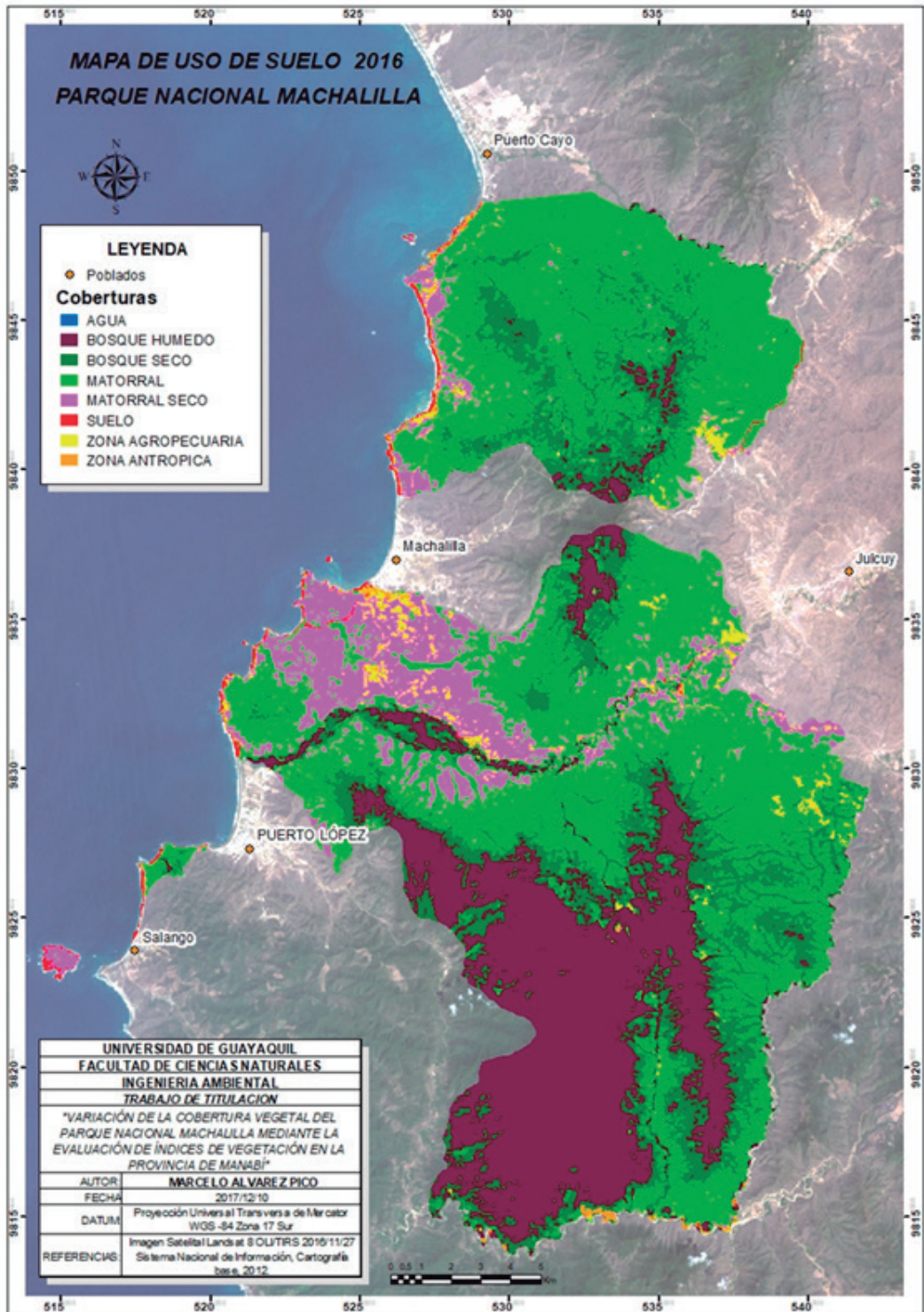


Figura 7. Clasificación de cobertura vegetal y uso de suelo 2000 del PNM a partir del NDVI.

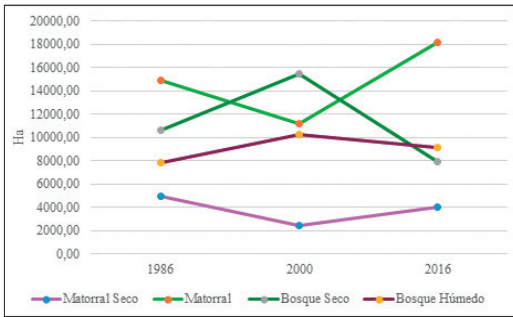


Figura 8. Línea de tiempo para las clases correspondiente a vegetación natural del PNM.

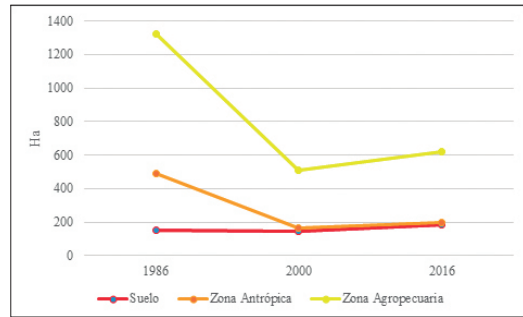


Figura 9. Línea de tiempo para las clases correspondiente Suelo, Zona Antrópica y Zona Agropecuaria del PNM.

Tabla 9. Tasas de cambios para los intervalos 1986-2000, 2000-2016 y 1986-2016

Cobertura	1986-2000			2000-2016			1986-2016		
	Área de cambio (ha)	Porcentaje	Tasa anual (ha)	Área de cambio (ha)	Porcentaje	Tasa anual (ha)	Área de cambio (ha)	Porcentaje	Tasa anual (ha)
Suelo	-6,60	-0,02	-0,47	37,79	0,09	2,36	31,19	0,07	1,04
Z. Antrópica	-324,68	-0,78	-23,19	27,25	0,07	1,70	-297,43	-0,71	-9,91
Z. Agropecuaria	-814,52	-1,95	-58,18	112,38	0,27	7,02	-702,14	-1,68	-23,40
Matorral Seco	-2453,37	-5,88	-175,24	1590,61	3,81	99,41	-862,76	-2,07	-28,76
Matorral	-3695,66	-8,85	-263,98	6987,89	16,74	436,74	3292,23	7,88	109,74
Bosque Seco	4832,29	11,57	345,16	-7544,81	-18,07	-471,55	-2712,52	-6,50	-90,42
Bosque Húmedo	2437,50	5,84	174,11	-1167,93	-2,80	-73,00	1269,57	3,04	42,32

Tabla 10. Tasa anual de pérdida o degradación de cobertura vegetal por intervalo de tiempo

Uso de Suelo	1986-2000	2000-2016	1986-2016
	Tasa anual (ha)	Tasa anual (ha)	Tasa anual (ha)
Matorral Seco	-14,11	-16,33	-6,98
Matorral	-55,17	-54,20	-41,09
Bosque Seco	-73,45	-30,75	-125,55
Bosque Húmedo	-38,47	-51,55	-21,66
TOTAL	-181,20	-152,83	-195,28

de material vegetal. De este total de hectáreas el 73,82% se encuentran en zonas de alta y muy alta susceptibilidad a variación de cobertura vegetal.

Las figuras 6 y 7 corresponden a los mapas de cobertura y uso del suelo del Parque Nacional Machalilla para los años 1986 y 2016 respectivamente, los cuales están representados en la Tabla 10.

La figura 10 muestra las categorías de susceptibilidad a la variación de la cobertura vegetal en el PNM, la cual está asociada a la proximidad a vías de acceso y zonas pobladas.

Discusión

En vista de los resultados encontrados en la presente investigación se valida la hipótesis planteada y se asevera que sí ha existido cambios y han acontecido reducciones en la cobertura vegetal del Parque Nacional Machalilla durante el periodo 1986-2016, estos cambios se han manifestado de manera positiva, indicando ganancia, y de manera negativa indicando degradación o pérdida de cobertura vegetal.

A través del uso de índices de vegetación se identificó ocho clases presentes en el PNM, de las cuales la más

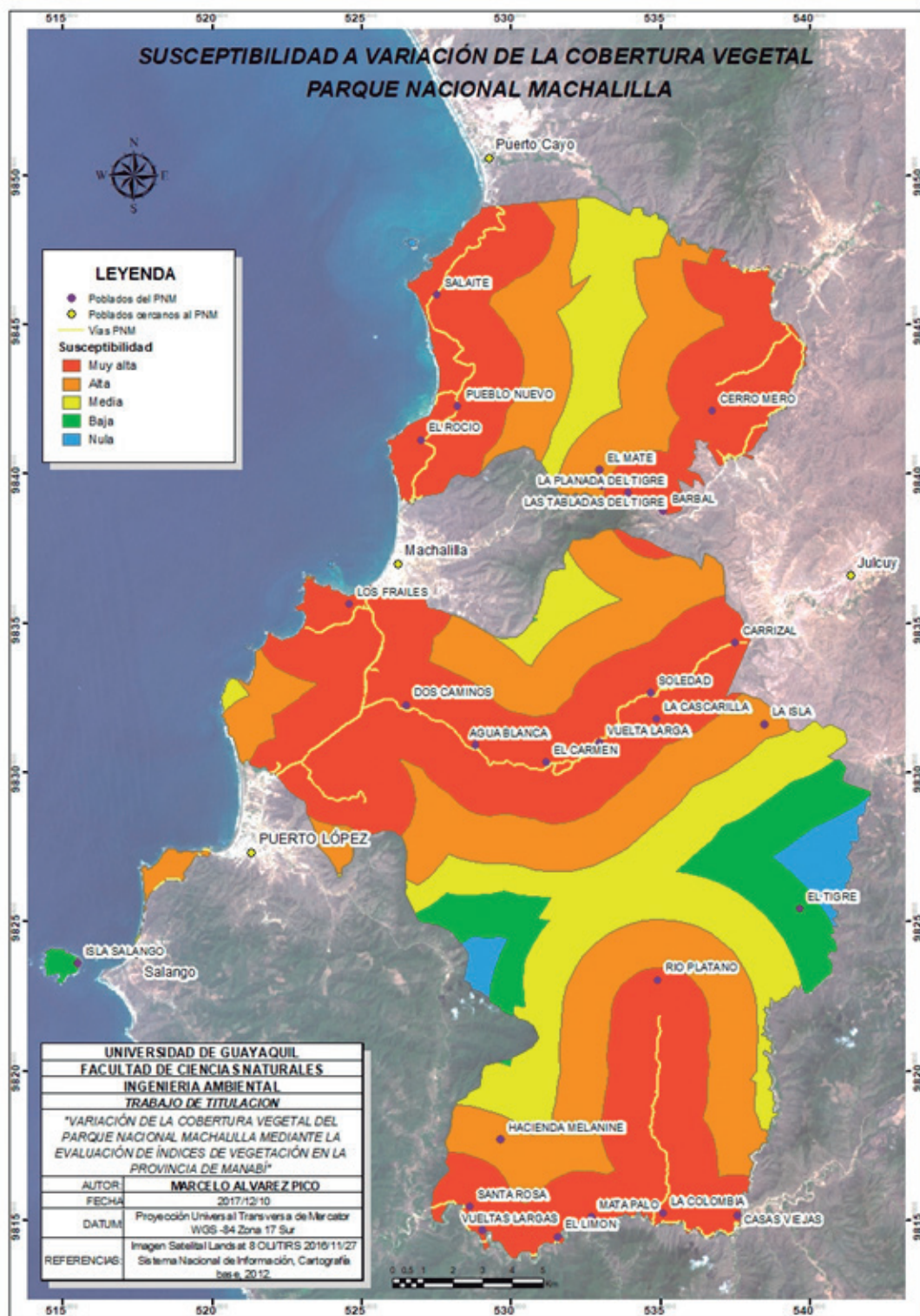


Figura 10. Mapa de Susceptibilidad a Variación de la Cobertura Vegetal del PNM

abundante es la clase matorral con un 43,47% del total de la superficie del parque para el año más reciente, lo que representa 18151,42 ha. Este porcentaje se aproxima a la cantidad que IEE (2016) indicó en su memoria técnica, el documento menciona que para el año 2016 la cobertura arbustiva en el área protegida representa el 40,51%.

Durante el primer periodo de análisis 1986-2000 la tasa de degradación anual fue 181,20 ha, y las coberturas que cambiaron significativamente fueron aquellas que representan al estrato arbustivo, juntas constituyen un cambio de 14,73% de la superficie del área protegida. De ese total, 311,57 ha se convirtieron en zona antrópica y zona agropecuaria, y alrededor de 8400 ha pasaron a formar parte del estrato arbóreo. INEFAN (1998) indica que para el periodo 1961-1996 aparecieron 9500 ha del estrato arbustivo, coincidentemente las mismas áreas se consolidaron en zonas boscosas años posteriores.

En el intervalo 2000-2016 se evidenció que la tasa de degradación disminuyó a 152,83 ha/año y hubo un aumento de las masas forestales. Este aumento provino de las clases suelo, zona antrópica y zona agropecuaria, constituyendo 508 ha más de masas forestales. Además, 9257 ha pasaron a ser de zonas arbustivas a zonas boscosas. Estos cambios favorables tienen razón de ser debido a los mecanismos de conservación y protección ejecutados desde la creación del Ministerio del Ambiente del Ecuador en 1998. Lo puesto en evidencia concuerda con lo aseverado por organismos internacionales como FAO (2016), el cual indica que durante los años del 2010 al 2015 se compensó la pérdida de cobertura boscosa por aquellas áreas agrícolas abandonadas alrededor del planeta.

En contraste, de los dos periodos mencionados anteriormente el que más presentó mayor tasa de degradación anual fue el periodo 1986-2000. Lo que se corrobora con lo mencionado por Martínez (2017) que para aquellas épocas desde que se logró la declaratoria de Machalilla como Parque Nacional en 1979 hasta inicios de la década de los noventa el área protegida sufrió degradación de su vegetación por actividades incompatibles como extracción de madera, pastoreo, asentamientos humanos y agricultura.

Producto de la clasificación supervisada de imágenes se evidenció que solo 2,39% de la superficie del área protegida corresponde a clases suelo, zona antrópica y zona agropecuaria, y que mayoritariamente su extensión corresponde a vegetación natural (94,06%), teniendo en cuenta que la clase que más conservó su superficie fue el bosque húmedo. Lo cual es un indicador de que actualmente PNM presenta mejores condiciones de conservación en sus zonas terrestres que en décadas pasadas.

Finalmente, a través del análisis espacial se generó la cartografía de susceptibilidad a variación de la cobertura vegetal. La cual corroboró que zonas que

han sufrido pérdida y degradación en sus masas vegetales están estrechamente relacionadas a la aproximación geográfica de estas a poblados y vías pavimentadas, lastradas y trochas abiertas. Lo cual indica que el 73,82 % de la pérdida de cobertura vegetal sucedida en los últimos 30 años se encuentran dentro de las zonas delimitadas como “muy alta” y “alta” susceptibilidad a variación.

Conclusiones

- Durante los 30 años de análisis del presente estudio se determinó que hubo una pérdida neta de cobertura vegetal de 505,1 ha en el Parque Nacional Machalilla.
- De la extensión terrestre total del área protegida, 39.274 hectáreas corresponden a vegetación natural, lo que representa 94,06%. Solo el 2,4% corresponde a suelo desprotegido, zonas antrópicas y zonas agropecuarias.
- Mediante la cartografía generada de susceptibilidad a variación de la cobertura vegetal se dio a conocer que el 73,82 % de las pérdidas de cobertura vegetal se situaron en zonas de alta y muy alta susceptibilidad, las cuales corresponden áreas cercanas a la franja costera y al valle de Buena Vista o también conocido Comuna de Agua Blanca.

Recomendaciones

- Analizar los efectos del cambio climático en la vegetación del PNM, además de conocer la correlación de parámetros climáticos con índices de vegetación.
- Actualizar con carácter urgente el Plan de Manejo del Parque Nacional Machalilla. Lo cual debe ser gestionado por el ministerio de ramo, actores sociales y demás entidades gubernamentales en materia ambiental.
- Incentivar a las familias establecidas al interior del Parque Nacional para que desarrollen actividades compatibles con la conservación y protección del área protegida.
- Proponer estrategias ambientales para promover la protección y conservación de la cobertura vegetal del bosque seco tropical de la zona de estudio.
- Empezar campañas de concientización ambiental en centros educativos y poblados al interior y cercanos al área protegida para fomentar una cultura de protección hacia la naturaleza.
- Aplicar las técnicas descritas de este estudio en otras áreas protegidas del territorio nacional para maximizar el alto beneficio y bajo costo que provee su desarrollo.

Referencias

- Aguilar Arias, H., Mora Zamora, R., & Vargas Bolaños, C. (2014). Metodología para la Corrección Atmosférica de

- Imágenes ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 Y LANDSAT 8 con el Módulo FLAASH del Software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39-59.
- Ahmed, K., & Akter, S. (2017). Analysis of landcover change in southwest Bengal delta due to floods by NDVI, NDWI and K-means cluster with landsat multi-spectral surface reflectance satellite data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*(8), 168-181.
- Álvarez-Bermúdez, X., Valero-Gutiérrez, E., Picos-Martín, J., & Ortiz-Torres, M. (2015). Study of Land Cover of Monte Forgoselo using Landsat Thematic Mapper 5 Images (Galicia, NW Spain). *DYNA*, 82(190), 173-181.
- Casal, G., & Freire, J. (2012). Síntesis de la evolución histórica de la teledetección en España (1889-2012). *Teledetección*(38), 109-120. Obtenido de http://www.aet.org.es/revistas/revista38/Numero38_10.pdf
- Chuvioco, E. (2010). *Teledetección Ambiental*. Barcelona, España: Planeta, S.A.
- Emery, W., Camps, A., & Rodríguez-Cassola, M. (2017). *Introduction to Satellite Remote Sensing*. Colorado: Elsevier B. V. doi:doi.org/10.1016/B978-0-12-809254-5.12001-9
- FAO. (2016). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-i5850s.pdf>
- Gabàs Masip, J. (2015). Maxwell: la teoría electromagnética de la luz. *Arbor*, 191(775), 191. Obtenido de <http://arbor.revistas.csic.es/index.php/arbor/article/view/2068/2628>
- Ghandi, M., Parthiban, S., Thummalu, N., & Christy, A. (2015). Ndvi: Vegetation change detection using remote sensing and GIS-A case study of Vellore district. *Procedia Computer Science*, 57, 1199-1210.
- IEE. (2016). Proyecto Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional 1:25000. Cobertura y Uso de Suelo Parque Nacional Machalilla. Obtenido de IDEPORTAL/IEE: http://www.ideportal.iee.gob.ec/nacional/areas_pane/machalilla.html
- INEFAN. (febrero de 1997). Instituto Ecuatoriano Forestal y Áreas Naturales y Vida Silvestre. Recuperado el junio de 27 de 2017, de Dirección Nacional de Áreas Naturales y Vida Silvestre: <http://simce.ambiente.gob.ec/sites/default/files/documentos/geovanna/Estudio%20del%20Uso%20Actual%20y%20Potencial%20del%20Suelo%20E%80%93%20Diagnostico%20Hidro%20C%20B%20gico%20y%20Calidad%20de%20Agua.pdf>
- IPCC. (2013). *Glosario. Cambio Climático 2013 Bases físicas*. (S. Planton, Ed.) Cambridge, New York, Reino Unido, EEUU. Recuperado el 25 de septiembre de 2017, de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGI_AR5_glossary_ES.pdf
- Knight, J. F., & Lunetta, R. S. (2003). An Experimental Assessment of Minimum. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(9), 2132-2134. Obtenido de http://users.clas.ufl.edu/mbinford/geo4120c/Knight_and_lunetta_2003_Minimum_Mapping_Unit_size_study_IEEETrans.pdf
- Kong, J. (2014). *International Conference on Remote Sensing and Wireless Communications (RSWC 2014)*. (J. Kong, Ed.) Shanghai: DEStech Publications, Inc.
- Landis, J., & Koch, G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*(33), 74-159.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (Vol. 7th Edition). Wisconsin, Estados Unidos: John Wiley & Sons. Inc. Recuperado el 2017
- MAE. (2007). *Plan Gerencial del Parque Nacional Machalilla, 2008-2010*. Quito. Obtenido de <http://suia.ambiente.gob.ec/documents/783967/890928/Plan+Gerencial+del+Parque+Nacional+Machalilla.pdf/168906c9-242b-46b8-abb8-9786c1cede91>
- Martínez, S. (11 de Noviembre de 2017). Breve Reseña Histórica del PNM. (M. Álvarez, Entrevistador)
- Mather, P., & Tso, B. (2016). *Classification methods for remotely sensed data*. (Segunda ed.). New York: CRC press.
- Ministerio del Ambiente. (2012). *Línea Base de Deforestación del Ecuador Continental*. Quito. Obtenido de <http://sociobosque.ambiente.gob.ec/files/Folleto%20mapa-parte1.pdf>
- Shultz, M., Clevers, J., Carter, S., Verbesselt, J., Avitabile, V., Quang, H., & Herold, M. (2016). Performance of vegetation indices from Landsat series in deforestation monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 318-327.
- UICN. (2017). Unión Internacional de Conservación para la Naturaleza. Recuperado el 26 de junio de 2017, de <https://www.iucn.org/es/regiones/am%C3%A9rica-del-sur/nuestro-trabajo/%C3%A1reas-protegidas/categor%C3%ADas-de-manejo-de-%C3%A1reas-protegidas-de-uicn>
- Yengoh, G., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A., & Tucker, C. (2014). The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales. (Lund University Center for Sustainability Studies, & STAP/GEF, Edits.) Lund: LUCSUS.