

Análisis del cambio forestal basado en Teledetección en la zona protegida San Marcelino República de El Salvador, Centroamérica

Analysis of forest change based on remote sensing in the San Marcelino protected area, Republic of El Salvador, Central America

Daro Cristián Arias Jaco
Universidad de Sonsonate
daro.arias@usonsonate.edu.sv
<https://orcid.org/0009-0004-8723-9547>

Resumen

El estudio muestra el análisis del cambio forestal presentado en la zona protegida San Marcelino, El Salvador, Centroamérica, específicamente donde existe vestigio de erupción del antes volcán San Marcelino. El área natural protegida complejo San Marcelino actualmente forma parte del Sistema de Áreas Naturales Protegidas de El Salvador. De acuerdo con el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), la extensión del Complejo es de 1,612 hectáreas aproximadamente (EDICIONBIOMA, 2021). El objetivo es analizar el cambio ambiental-forestal en la zona protegida, presentando un estudio exploratorio, abordado desde la teledetección, usando imágenes del Sentinel-2, analizando el comportamiento de bandas y construcción de índices de vegetación. El estudio está

centrado en el análisis de cambio forestal en los últimos 5 años (de 2018-2022); en estos 5 años se aborda el cambio y crecimiento de la vegetación basado en índices de vegetación específicamente el índice de vegetación NDVI de diferencia normalizada; el índice de vegetación es presentado mediante imágenes de la actividad fotosintética, que son comparadas mediante gráficas por periodos de un mes y contrastadas con el gráfico de comportamiento del índice en relación a sus valores cuantitativos.

Palabras clave: Bandas de satélite, cambio forestal, impacto climático, índices de vegetación, sentinel-2, teledetección.

Abstract

This study analyzes forest change in the San Marcelino Protected Area, located in El Salvador, Central America. The area includes traces of the former San Marcelino volcano eruption and is currently part of El Salvador's Natural Protected Areas System.

According to the Ministry of Environment and Natural Resources (MARN), the Complex covers approximately 1,612 hectares (EDICIONBIOMA, 2021). The objective is to analyze the environmental-forest change in the protected area, presenting an exploratory study, approached from remote sensing, using Sentinel-2 images, analyzing the behavior of bands and construction of vegetation indices.

This study is focused on the analysis of forest change in the last 5 years (from 2018 to 2022); in these five years, the change and growth of vegetation are dealt with based on vegetation indices specifically the normalized difference NDVI vegetation index; the vegetation index is presented through images of photosynthetic activity, which are compared through graphs for periods of one month and contrasted with the graph of index behavior in relation to its quantitative values.

Keywords: satellite bands, forest change, climate impact, vegetation indices, sentinel-2, remote sensing.

Introducción

Según el inventario general de bosques de El Salvador (MARN, Inventario nacional de bosques de El Salvador, 2018), el país cuenta con un 37.9 % de territorio (799,209.32 hectáreas) considerado boscoso, incluyendo todas las clasificaciones de bosques, siendo la fuente principal y fundamental de oxígeno y reserva de carbono en el país. Considerando el aumento de la población, expansión de las zonas urbanas, la tala indiscriminada e ilegal, el cambio climático y otra serie de riesgos, estas áreas forestales que son fundamentales para la biodiversidad y la vida, se ven significativamente amenazadas (García et al., 2022).

El área natural protegida Complejo San Marcelino representa aproximadamente el 0.202 % de la superficie total de bosques del país (con una extensión de 1,612 hectáreas), aparentemente poco; sin embargo, comparando su extensión con el municipio de Sonsonate (el más grande del departamento de Sonsonate con una extensión de 23,250 ha) representa el 6.93 % de su superficie, y en el caso de Izalco (segundo municipio más grande del departamento, con 17,590 ha) representaría el 9.16 % de la extensión Izalqueña; en comparación con todo el departamento de Sonsonate (122,600 ha), representaría el 1.31 % de la superficie departamental a la que abastece de oxígeno, principalmente en la zona norte; además, Sonsonate es el departamento que menos territorio de bosque posee en el país en torno al 2.45 % de la superficie total a nivel nacional (García et al., 2022).

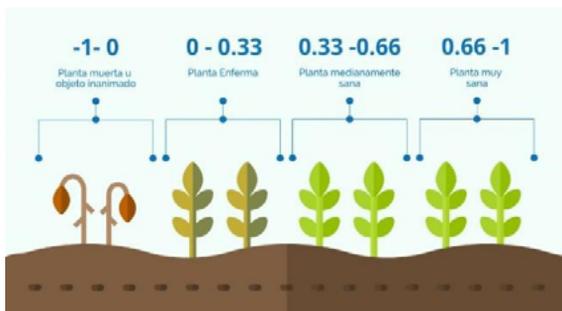
TEMA 5

Si bien el tema medioambiental es muy estudiado, en la zona protegida San Marcelino no se tiene un estudio de este tipo, es decir, una investigación con análisis de crecimiento y cambios en el bosque desde una perspectiva como la propuesta en este estudio. De hecho, en el país, esta investigación puede formar parte de un antecedente para diferentes dependencias y sectores que se interesen en este tema, tanto en la investigación como la toma de acciones en pro del medio ambiente.

Los índices de vegetación se refieren a un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los píxeles de las imágenes obtenidas del Sentinel-2, usando dos o más bandas pertenecientes a la misma escena. Un índice de vegetación, puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Gilabert et al., 1997).

Figura 1

Valores de referencia de NDVI

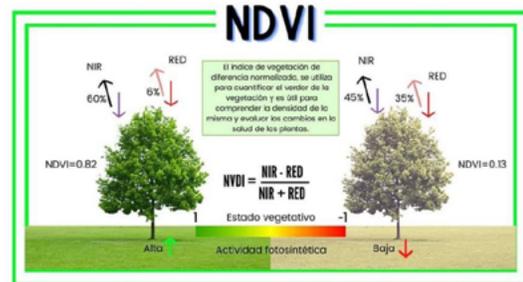


Nota. Fuente: <https://www.auravant.com/blog/agricultura-de-precision/indices-de-vegetacion-y-como-interpretarlos/>

Los valores bajos de los índices de vegetación usualmente indican vegetación poco vigorosa; mientras que los altos, indican vegetación más saludable.

Figura 2

Referencia NDVI según actividad fotosintética



Nota. Fuente: <https://www.auravant.com/blog/agricultura-de-precision/indices-de-vegetacion-y-como-interpretarlos/>

El índice para usar en un ambiente particular debe ser cotejado con mediciones en terreno. De no haber mediciones disponibles, esas imágenes de índices solo serán indicadores útiles de la cantidad relativa de vegetación presente; en este estudio se realizaron visitas técnicas para comprobar algunos elementos, incidentes y vegetación real.

Metodología

El tipo de estudio se refiere a un estudio de tipo exploratorio. Según Hernández Sampieri, (2014), los estudios exploratorios se realizan cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del

cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes.

El propósito de la investigación es estudiar y analizar el cambio forestal en la zona protegida, observando el comportamiento mediante índices de vegetación, visitas de campo e imágenes satelitales con el objetivo de poder indagar y presentar la información de manera que se pueda tomar acción basado en datos estadísticos y análisis más específicos del lugar.

Las unidades de análisis usadas en el estudio son las siguientes: área de estudio y la tecnología para el análisis.

El perímetro para la zona a estudiar fue delimitado mediante Google Earth y refinado con visitas técnicas al lugar; luego, usado en Google Engine para su procesamiento, fueron aplicados filtros por perímetro y filtros de cortes para poder delimitar tanto la visualización como los análisis, únicamente a la zona de estudio; para esta tarea se extrajeron imágenes del Sentinel-2 y se usó una porción geométrica con 275 puntos, por lo que la zona está compuesta por un polígono cuyos 275 puntos (coordenadas) fueron colocados de manera que se cubra la zona estudiada de manera íntegra.

Figura 3

Zona perimetral estudiada San Marcelino



Para obtener los índices de vegetación de la información satelital que es una imagen con múltiples bandas, esta información debe poder ser categorizada y agrupada, para permitir discriminar un área con características particulares de otra. Una forma de expresar esta categorización o agrupamiento, es mediante la elaboración de índices. Para este estudio se tomaron imágenes del Sentinel-2, y se procedió con la elaboración de índices de vegetación. El índice usado en esta investigación es el NDVI; este usa el cociente de la reflectancia de una banda con otra, (usualmente rojo e IR cercano, debido al alto contraste o diferencia en la reflectancia, que presenta la clorofila en ambas bandas) (Aguayo, 2013).

Una vez finalizado el proceso de recolección de información, los datos fueron procesados y posteriormente analizados. La información obtenida se procesó usando como apoyo un software basado en hojas de cálculo estadístico, lo que resulta de gran ayuda al momento de procesar grandes cantidades de información; además, se utilizaron softwares como Google Maps y Google Earth, así como Google Engine, ArcGIS y Python para el análisis de datos satelitales. Por último, se facilita la visualización e interpretación de los resultados obtenidos en el estudio mediante gráficas y visualizaciones de Figuras de índices de vegetación.

Resultados

Comportamiento de la vegetación y eventos ambientales

En las Figuras de este apartado, se visualiza el comportamiento del índice de vegetación NDVI de los meses con mayores eventos destacables; en estas figuras se extraen los datos de una serie temporal separado por 1 mes y posteriormente se grafica ese índice para lograr una visión holística de los meses analizados; dicho de otro modo, se presenta la imagen en la cual se muestra el índice de vegetación según su actividad fotosintética y luego la gráfica en la cual se muestra el valor numérico del índice de vegetación, por lo que el crecimiento en la gráfica indica un incremento en la vegetación, y el decremento de la gráfica, un descenso en la vegetación del perímetro; el índice máximo de nubosidad es del 10 %, buscando con ello maximizar la efectividad de las imágenes analizadas.

Índices de vegetación del mes de enero

En las imágenes de las Figuras 4, 5, 6, 7, y 8 se aprecia el índice de vegetación NDVI del mes de enero, según su actividad fotosintética. Es importante señalar que los valores del NDVI pueden variar únicamente en el intervalo de -1 a 1; en las Figuras se presenta el índice según su actividad fotosintética, pero en la Figura 9 se muestra el valor promedio general para el perímetro de la zona del mes en cuestión.

El año 2021 presenta un mejor índice de vegetación (0.40828812), lo que es apreciable en las imágenes del perímetro que presentan un mayor número de píxeles con un verde intenso,

lo que marca una mejor vegetación según actividad fotosintética, siendo el mes de enero de 2022 el que presenta el peor índice de vegetación (0.34128207).

Figura 4

Índice NDVI periodo enero de 2018

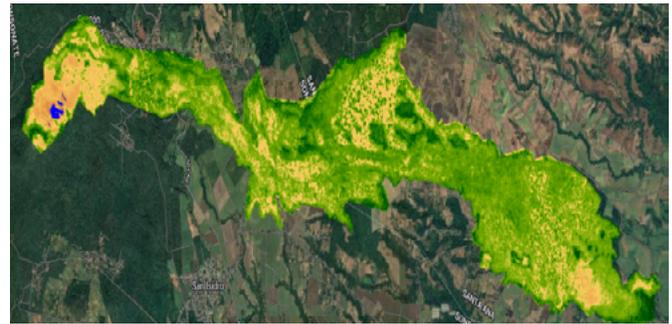


Figura 5

Índice NDVI periodo enero de 2019

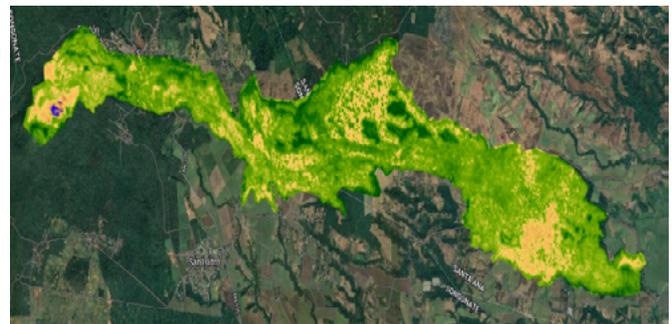


Figura 6

Índice NDVI periodo enero de 2020



Figura 7

Índice NDVI periodo enero de 2021



Figura 8

Índice NDVI periodo enero de 2022

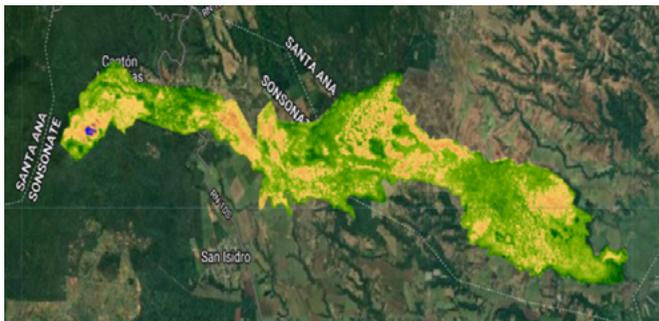


Figura 9

Índice NDVI periodo enero de 2022



El contraste entre las Figuras 10 y 11 es importante para entender el funcionamiento del índice de vegetación según su actividad fotosintética; se aprecia como en la Figura 8 se tiene un

índice de vegetación con diferencia de colores y valores más bajos, y en contraste la Figura 10 muestra el estado de esta zona, desde una imagen satelital. En concreto, hay zonas como la zona de color negro en la Figura 11 en donde la vegetación es nula; de hecho, es un material rocoso muy parecido al balastro negro; en esa zona no hay flora de ningún tipo y se aprecia tanto en la Figura 11, que es una vista satelital y en la Figura 10 que muestra el índice de vegetación de esta zona.

Se aprecia, además, en este contraste, como las zonas con menos vegetación tienen un color diferente y las zonas con más vegetación un verde más intenso. Incluso, la zona con poca vegetación tiene un color amarillo, lo que marca una vegetación poco densa, la cual se visualiza de mejor manera con la fotografía tomada en enero de 2021 y que se logra apreciar en la Figura 12. En ella se aprecia, de manera muy notoria, los colores amarillos que son muy característicos de esta zona, ya que hace referencia no solo a la maleza seca, sino también a la poca vegetación y densidad forestal en ese momento del año.

Es importante tomar en contraste estas 3 imágenes (Figuras 10 y 11 tomadas del Sentinel-2) y la Figura 12 tomada en una visita técnica; se aprecia la vegetación real y se logra notar la diferencia entre las zonas verdes, amarillas y zonas menos verdes, lo que permite entender el análisis del índice de vegetación según su actividad fotosintética y dar una idea, a lo largo del presente estudio, de cómo se puede usar este análisis para tomar nota de una gran cantidad de terreno mediante la teledetección, sin dejar de mencionar que, no solo depende del

TEMA 5

color, que para efectos gráficos es mucho más fácil apreciar una imagen que una cuadrícula con millones de valores numéricos, pero que a lo largo del análisis, este valor numérico acompaña a cada imagen del índice de vegetación.

Figura 10

Índice NDVI periodo enero de 2022 del cerro San Marcelino

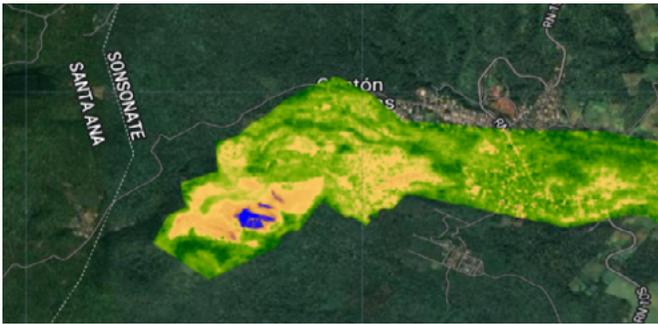


Figura 11

Vista de satélite cerro San Marcelino en enero de 2022

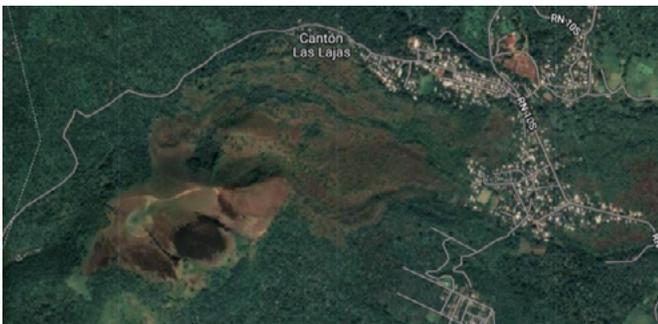


Figura 12

Fotografía del cerro San Marcelino



Índices de vegetación del mes de febrero

En las imágenes de las Figuras 13, 14, 15, 16 y 17 se aprecia el índice de vegetación NDVI para el mes de febrero de los años en análisis; en el año 2021 se tiene un mejor índice de vegetación, con un valor de 0.35008648 y, el año 2022, un peor índice, con el 0.13362291.

Figura 13

Índice NDVI periodo febrero de 2018

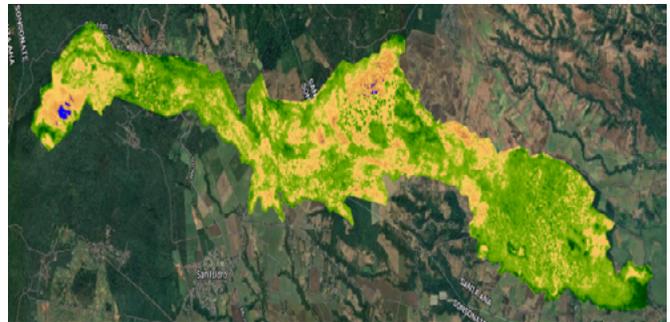


Figura 14

Índice NDVI periodo febrero de 2019

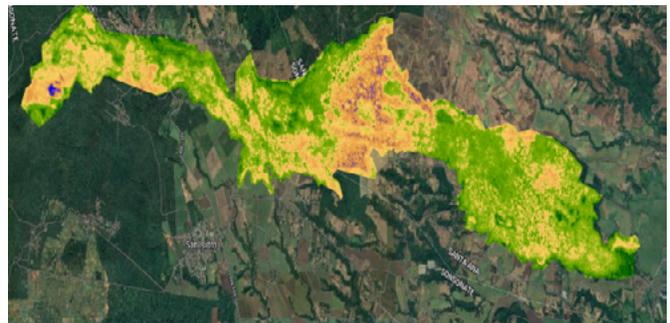


Figura 15

Índice NDVI periodo febrero de 2020



Figura 16

Índice NDVI periodo febrero de 2021

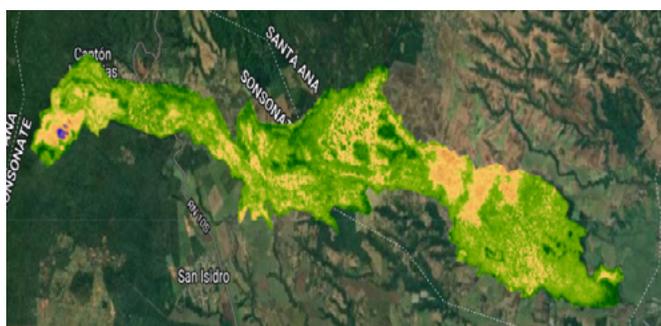


Figura 17

Índice NDVI periodo febrero de 2022

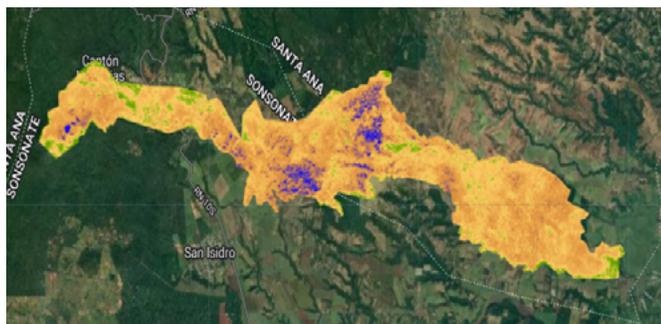
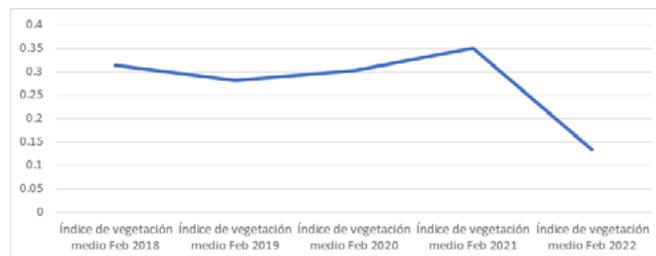


Figura 18

Índice de vegetación febrero 2018-2022



En las imágenes de las Figuras 13, 14, 15, 16 y 17 se aprecia el índice de vegetación NDVI para el mes de febrero de los años en análisis; esto, desde la perspectiva fotosintética. Es muy importante resaltar que el mes de febrero del año 2021 presenta ligeramente un índice de vegetación mayor en comparación con el mes de febrero de los diferentes años del análisis (0.3135858 para el año 2018, 0.28085545 para el año 2019, 0.3025192 para el año 2020 y para el año 2021, 0.3500864). Lo verdaderamente notorio e importante de resaltar es el pobre índice que hay para el mes de febrero de 2022 (0.13362291); la diferencia es muy notoria, presentando muchos colores amarillos que, como ya se dijo anteriormente, representa una poca densidad forestal en relación a la actividad fotosintética. Es también importante destacar que, en cuanto al análisis el año 2022 y sus meses en general, presentan un menor índice de vegetación, lo cual es preocupante debido al cambio tan notorio y brusco por el menos apreciado, en el mes de febrero.

Índices de vegetación del mes de marzo

En las imágenes de las Figuras 19, 20, 21, 22 y 23 se aprecia el índice de vegeta-

TEMA 5

ción NDVI para el mes de marzo de los años en análisis. Marzo es uno de los meses más importantes para el análisis, ya que representa uno de los meses más secos, en cuanto a precipitaciones de lluvia y uno de los meses precedentes a la entrada del invierno, por lo que se puede tener una mejor visualización previa a la entrada del invierno.

Figura 19

Índice NDVI periodo marzo de 2018

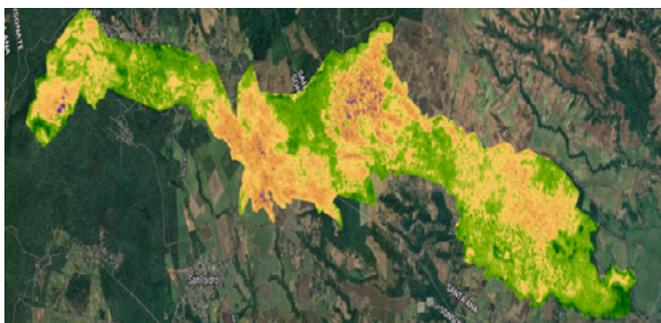


Figura 20

Índice NDVI periodo marzo de 2019

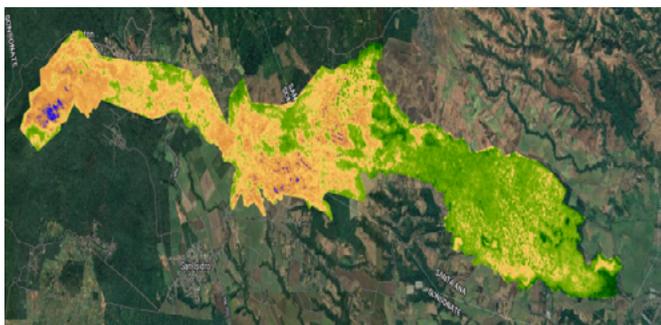


Figura 21

Índice NDVI periodo marzo de 2020

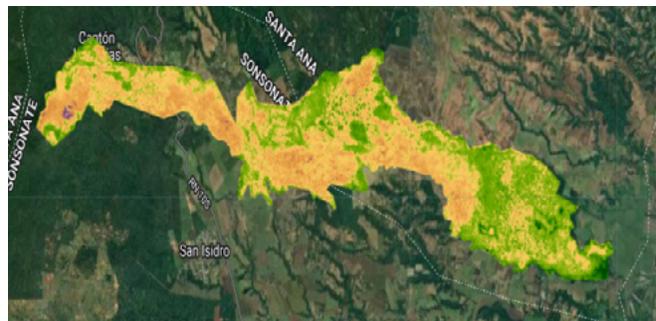


Figura 22

Índice NDVI periodo marzo de 2021



Figura 23

Índice NDVI periodo marzo de 2022

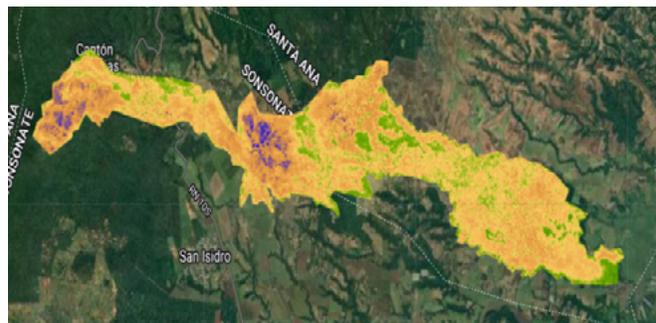


Figura 24

Índice de vegetación marzo 2018-2022



El mes de marzo es el preámbulo a la entrada del invierno que, si bien las primeras tormentas escasas son en abril, marzo es el mes donde la época seca finaliza, y, por ende, es un mes donde el índice de vegetación muestra sus puntos más bajos. Los meses del año 2021 son los que registran un mayor índice de vegetación y muy preocupante es cómo es el índice de vegetación de marzo de 2022 (0.16702335) en comparación con el mismo mes de marzo, pero en diferentes años: 0.2617854 para el 2018, 0.26003674 para 2019, 0.2348387 para 2020 y 0.30399573 para el año 2021. La diferencia es muy notoria y el índice de vegetación es muy bajo. Otro punto importante es como en la zona más alejada del cerro San Marcelino, es decir la zona donde termina el vestigio de erupción, es donde se puede encontrar los mayores índices de vegetación, en comparación con toda la zona ese mismo mes.

Índices de vegetación del mes de abril

En las imágenes de las Figuras 25, 26, 27, 28 y 29 se logra apreciar el índice de vegetación NDVI para el mes de abril de los años en análisis. En el año 2021 se tiene un mejor índice de vegetación, con un 0.38062862.

Figura 25

Índice NDVI periodo abril de 2018

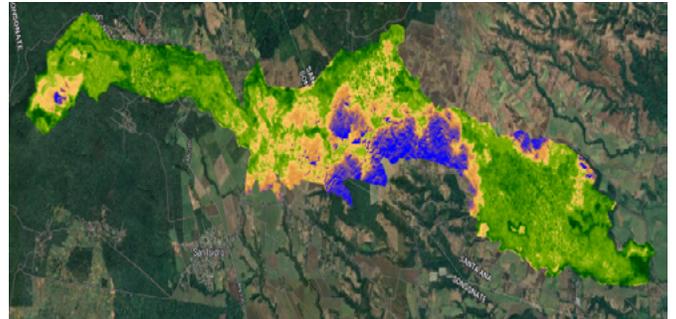


Figura 26

Índice NDVI periodo abril de 2019

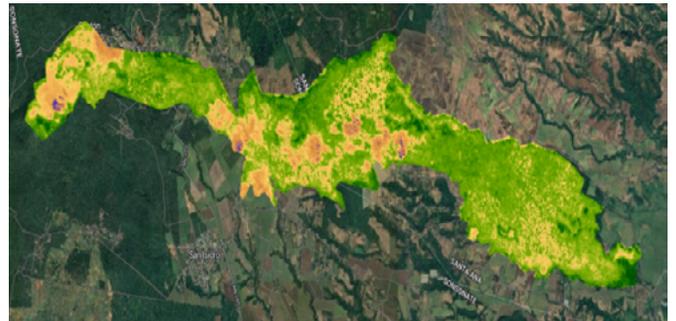
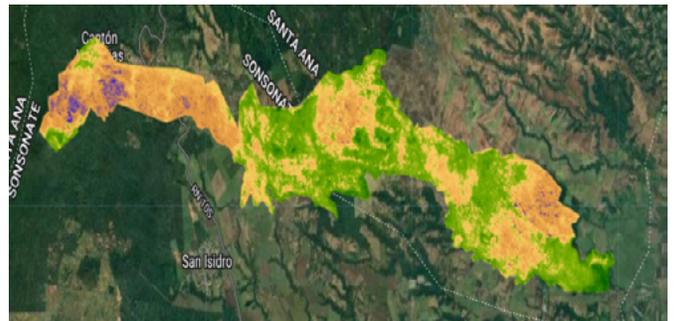


Figura 27

Índice NDVI periodo abril de 2020



TEMA 5

Figura 28

Índice NDVI periodo abril de 2021



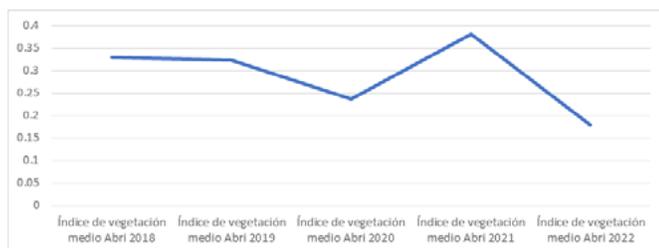
Figura 29

Índice NDVI periodo abril de 2022



Figura 30

Índice de vegetación abril 2018-2022



El mes de abril marca las primeras tormentas esporádicas en la zona, lo que genera un ligero incremento en el índice de vegetación que normalmente inicia luego de la segunda o

tercera semana de abril. En abril de 2022 y abril de 2020, se registra el menor crecimiento de vegetación, siendo abril de 2021 el que mayor índice presenta; pero, algo muy peculiar sucede en abril de 2022: se nota una zona en color azul lo cual representa una zona sin ninguna vegetación. Esto se aprecia justo en el cerro San Marcelino, su cordillera y zonas aledañas; este cambio registrado en la actividad fotosintética. Se debe a un incendio que devastó la zona; durante el siniestro, se tomaron fotografías en el momento preciso del suceso, momentos que se plasman en la Figura 31 y en la Figura 32. Se aprecia cómo el fuego dejó la zona luego de unos días de sucedido el siniestro. En la Figura 31 tomada en marzo de 2022, se aprecia cómo la zona quedó con una vegetación completamente disminuida, ya que pocos árboles sobrevivieron al voraz incendio.

Figura 31

Incendio zona protegida previo al análisis de abril



Figura 32

Zona protegida post incendio previo al análisis de abril



Nota. Fotografía realizada el 31 de marzo de 2022.

Índices de vegetación del mes de mayo

En las imágenes de las Figuras 33, 34, 35, 36, y 37, se aprecia el índice de vegetación NDVI para el mes de mayo desde una perspectiva de actividad fotosintética de los años en análisis. En el año 2021 se tiene un mejor índice de vegetación con valor de 0.65632373; mayo es el mes durante el cual el índice de vegetación inicia su ascenso constante, esto sucede por las primeras tormentas que hacen florecer las primeras plantas.

Figura 33

Índice NDVI periodo mayo de 2018

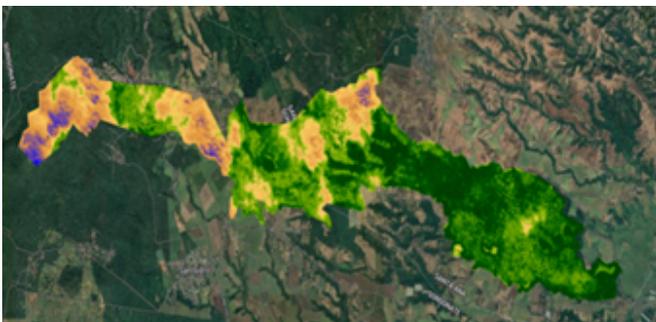


Figura 34

Índice NDVI periodo mayo-junio de 2019



Figura 35

Índice NDVI periodo mayo de 2020



Figura 36

Índice NDVI periodo mayo de 2021



TEMA 5

Figura 37

Índice NDVI periodo mayo de 2022



Figura 38

Índice de vegetación mayo 2018-2022



En mayo de 2020 ocurrió un fenómeno muy parecido al de abril de 2022, donde hay una zona que indica la incidencia de un evento inusual; si bien no se tiene un registro histórico de los incendios, se puede intuir que este color, en el índice de mayo de 2020, se puede deber a un evento similar; es decir, existe la posibilidad que sea debido a un incendio, lo cual es bastante usual, incluso a inicios de la época lluviosa.

Índices de vegetación del mes de junio

En las imágenes de las Figuras 39, 40, 41, 42 y 43 se aprecia el índice de vegetación NDVI para el mes de junio, de los años en análisis, siempre desde una perspectiva fotosintética.

Figura 39

Índice NDVI periodo junio de 2018

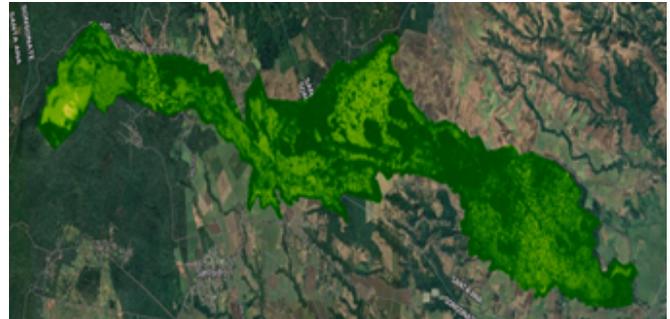


Figura 40

Índice NDVI periodo junio de 2019

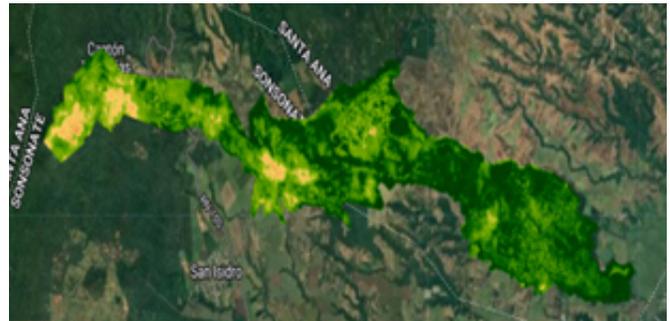


Figura 41

Índice NDVI periodo junio de 2020

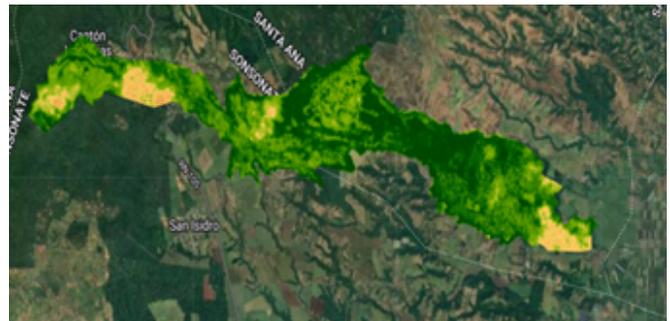


Figura 42

Índice NDVI periodo junio de 2021



Figura 43

Índice NDVI periodo junio de 2022



Figura 44

Índice de vegetación junio 2018-2022



El índice de vegetación en junio y julio es alto, superando incluso los 0.6 en los años de 2018 y 2022. En junio y julio la época lluviosa está en su mejor momento, lo que provoca

que la vegetación crezca de manera rápida, aunque en estos mismos meses se percibe un descenso muy leve en el comportamiento del índice de vegetación, lo que marca cuando buena parte de la población de comunidades como Las Lajas y La Chacarita comienzan los preparativos para cultivar, ya que, muchas de las tierras circundantes o dentro del perímetro, se usan para el cultivo, ya sea mediante el corte de maleza, el uso de herbicidas o la tala de árboles; esto hace que el comportamiento del índice de vegetación descienda; posteriormente se nivela debido a la característica de crecimiento rápido de los cultivos que se siembran, que en su mayoría son maíz, frijol y una cantidad muy pequeña de hortalizas, principalmente en viveros de la zona o viveros caseros.

En la Figura 45 se observa cómo el crecimiento del maíz hace que el índice de vegetación se vea afectado de manera positiva; la fotografía de la Figura 45 está a pocos metros (5 u 8 metros) de las fotografías de las Figuras 31 y 32; y el cambio es bastante marcado, tanto en el índice de vegetación tomado del satélite como en el terreno.

Figura 45

Cultivo de maíz zona cercana al cerro San Marcelino



TEMA 5

En la Tabla 1 se aprecian los índices de vegetación, mismos índices graficados y sobrepuestos en la Figura 46, lo que permite discutir los resultados obtenidos durante la investigación.

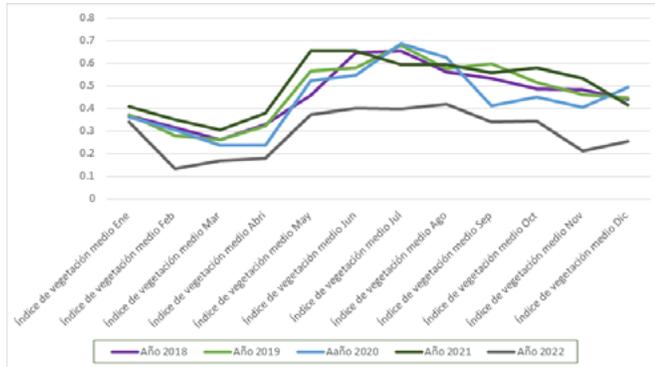
Tabla 1

Índices de vegetación zona protegida San Marcelino

PREGUNTA	2018	2019	2020	2021	2022
Índice de vegetación medio, enero	0.36754012	0.3736039	0.36123684	0.40828812	0.34128207
Índice de vegetación medio, febrero	0.3135858	0.28085545	0.3025192	0.35008648	0.13362291
Índice de vegetación medio, marzo	0.2617854	0.26003674	0.2348387	0.30399573	0.16702335
Índice de vegetación medio, abril	0.32921255	0.3229396	0.23770858	0.38062862	0.18026246
Índice de vegetación medio, mayo	0.4577326	0.5662961	0.52256614	0.65632373	0.37340885
Índice de vegetación medio, junio	0.6476722	0.5806869	0.5484982	0.65632373	0.40192273
Índice de vegetación medio, julio	0.6545487	0.67860335	0.6881966	0.5929841	0.39597636
Índice de vegetación medio, agosto	0.5615997	0.57443196	0.62605566	0.5929841	0.419434
Índice de vegetación medio, septiembre	0.53409076	0.5982235	0.41193524	0.5585382	0.34165585
Índice de vegetación medio, octubre	0.48498872	0.5144153	0.45062077	0.5793004	0.34317952
Índice de vegetación medio, noviembre	0.48360825	0.4612866	0.4058213	0.5313658	0.21031688
Índice de vegetación medio, diciembre	0.44187456	0.44742876	0.49305892	0.41554072	0.2539986

Figura 44

Índice de vegetación junio 2018-2022



Discusión

Según Gonzaga Aguilar (2015) existen inconvenientes en la obtención de datos, debido a la densidad de las estaciones en el área de estudio y vacíos de información en el registro de datos en algunas estaciones. Para el caso de la zona protegida San Marcelino se minimizó el efecto de la densidad de las estaciones en relación a un porcentaje de nubosidad por debajo del 10 %; sin embargo, esto hizo que el vacío en la información en los registros de datos aumentara, maximizando la calidad de las imágenes, pero disminuyendo la cantidad de las mismas; este efecto era necesario, y es mejor así que en el sentido contrario; es decir, mayor cantidad de imágenes, pero de menor calidad.

El Índice Normalizado de Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) ha emergido como una herramienta crucial en estudios ambientales y ecológicos. Su relevancia radica en la capacidad de proporcionar una represen-

tación cuantitativa de la vitalidad y salud de la vegetación en un área determinada (Pettorelli et al., 2005, citado por Gonzaga Aguilar, 2015). La variación en los valores de NDVI, presentados en una serie temporal, ofrece una visión detallada de las dinámicas de la vegetación, en relación con eventos específicos o condiciones ambientales.

El valor del índice NDVI varía entre -1 y +1; valores altos cercanos a 1 revelan alta actividad fotosintética de la cubierta vegetal (fenología foliar) y una estrecha relación con la evapotranspiración (Tucker y Sellers, 1986, citado por Arboit y Maglione, 2018). Los valores bajos cercanos a -1 indican situaciones de escasa o nula cubierta vegetal y baja actividad fotosintética. En Tabla 1 los valores del NDVI de la zona nunca están por encima de 0.8, pero en la mayor parte del año se mantiene por debajo de 0.5, lo cual es preocupante debido a la importancia de esta zona en cuanto a la flora, fauna y retención de agua.

El rango común para la vegetación se encuentra entre 0.2 a 0.8 (por encima del cual se tiende a saturar en bosques). Este índice, al representar la actividad fotosintética, está asociado con la biomasa, la productividad primaria neta, el secuestro de carbono, el estrés hídrico de la vegetación y la biodiversidad de los ecosistemas (Nagendra et al. 2013; Pereira et al. 2013, citado por Cruz Flores, Curbelo Benítez, y Ferrer Sánchez, 2020), por lo que, según los índices de vegetación presentados en la zona protegida San Marcelino (Tabla 1), está lejos de saturar en bosque debido a que no sobrepasa nunca, ni en sus mejores momentos, el 0.8 sugerido por Cruz Flores, Curbelo Benítez

TEMA 5

, y Ferrer Sánchez (2020); por ejemplo, en julio, apenas sobrepasa el valor de 0.65; esto cuando los cultivos de la zona se encuentran en su mejor momento en cuanto a follaje, y mucha de la maleza, y árboles que con la entrada del invierno se vieron afectados positivamente, ven sus puntos de vigorosidad más altos.

Según Piscoya Pérez (2019), conocer la cobertura vegetal es importante para lograr la gestión sustentable de los recursos; asimismo, para la conservación de biodiversidad y mitigar los impactos ambientales y el cambio climático. En ese sentido, se destaca el comportamiento en el mes de septiembre, donde algunas zonas aledañas limítrofes de la zona protegida empiezan a sufrir una leve disminución debido al proceso de dobla de maíz, y siembra de frijol, por lo que el descenso no es tan marcado; sin embargo, algo muy importante a destacar: es que mucha de la población que se dedica al cultivo de semillas, para evitar la sombra en sus cultivos, o simplemente para tener un poco más de área disponible para la siembra, tala parte de la división que hay entre las aradas y la zona protegida; esto se refleja en el comportamiento del índice de vegetación en las zonas limítrofes, disminuyendo, justo, en el franja divisoria de San Marcelino.

La interpretación de los datos muestra cómo ciertos meses, debido a eventos específicos o factores estacionales, presentan variaciones en el índice de vegetación. El mes de febrero, por ejemplo, ha demostrado tener variaciones considerables en los años analizados. Mientras que el índice de vegetación, para febrero de 2021, fue ligeramente superior en comparación con otros años; febrero

de 2022 exhibió una disminución drástica. Tales descensos, en el NDVI, son indicativos de alteraciones en la salud de la vegetación, lo que puede deberse a factores ambientales adversos, eventos climáticos extremos o intervenciones humanas (Arboit y Maglione, 2018). El mes de abril, por otro lado, es testigo de las primeras tormentas esporádicas en la región. Estas precipitaciones pueden traducirse en un incremento en la salud de la vegetación, evidenciado por un aumento en el NDVI. Sin embargo, no todos los años siguen la misma tendencia. Abril de 2022, en particular, destacó por la aparición de una zona en color azul, lo cual indica la ausencia total de vegetación. Esta devastación es atribuida a un incendio forestal que arrasó el cerro San Marcelino. Los incendios forestales son eventos catastróficos que pueden alterar drásticamente el paisaje y tener efectos a largo plazo en la salud del ecosistema.

Los ecosistemas afectados por incendios pueden tardar años, incluso décadas, en recuperarse a su estado original, y la recuperación puede depender de una serie de factores, incluida la gravedad del incendio, las condiciones ambientales posteriores y las intervenciones de manejo (Cruz Flores, Curbelo Benítez, y Ferrer Sánchez, 2020). Los incendios forestales son uno de los más grandes peligros que corren los bosques. La falta de políticas públicas e inversión para la detección y aplacamiento de los incendios forestales, es una carencia de las gestiones actuales (Piscoya Pérez, 2019). En este sentido, el análisis de cobertura forestal, mediante el índice NDVI, contribuye para conocer incidentes como incendios o tala indiscriminada, es decir que puede servir de insumo para el análisis y planeación de

políticas públicas para controlar y mitigar este tipo de incidentes.

Continuando con la discusión de los resultados, en octubre, las tormentas son ya muy raras; precisamente por eso, mucha de la vegetación como la maleza o árboles no aclimatados o débiles, empiezan a ceder ante las inclemencias del clima, que abonado a la poca vegetación y a la abundante roca que hacen que el calor sea mayor, impacten de forma significativa la flora y esto se ve reflejado en las Figuras analizadas desde una perspectiva fotosintética donde se observa una disminución en el índice de vegetación. Desde el mes de septiembre puede percibirse el decremento en la densidad de la vegetación, haciéndose más notoria en los meses de noviembre y diciembre, y, por supuesto, los meses más secos; enero, febrero marzo y parte del mes de abril.

Para concluir, el monitoreo y análisis del NDVI es esencial para comprender y predecir cómo los ecosistemas responden a eventos específicos y cambios ambientales. Las herramientas y técnicas que permiten tal monitoreo, son indispensables para la conservación y gestión efectiva de los recursos naturales.

Conclusiones

- + Patrón estacional: Se puede observar un patrón estacional en los datos del NDVI. Hay picos en ciertos meses, seguidos de descensos. Esto es típico en áreas donde la vegetación responde a patrones

climáticos, como la estacionalidad de las lluvias.

- + Año 2021: este año muestra el índice NDVI más alto entre todos los años presentados, especialmente entre los meses de marzo y julio. Esto indica condiciones favorables para la vegetación durante ese período, como una temporada de lluvias más intensas, o menos actividad humana que afecte la vegetación; por ejemplo, a nivel mundial, el 2021 es un año de poco impacto humano en el medio ambiente debido a la limitación de la pandemia del COVID 19.
- + Tendencia decreciente en 2022: se nota una tendencia decreciente en el índice NDVI, en el año 2022, en comparación con años anteriores. Esto se debe diversos factores, como condiciones climáticas menos favorables, aumento de la actividad humana e incluso eventos naturales como los incendios.
- + Comparación entre 2018 y 2022: aunque ambos años inician y finalizan con valores similares del índice, el comportamiento a lo largo del año es bastante distinto. Esto resalta la variabilidad interanual y cómo factores externos pueden influir en la vegetación de un año a otro.

Recomendaciones

A manera de recomendación se puede obtener una mayor cantidad de imágenes en cuanto al análisis de teledetección; además de trabajar con índices de nubosidad bajos para mejorar la calidad del análisis, también se debe delimitar con una mayor cantidad de puntos la zona protegida. Esto sería equivalente a trabajar con un fractal; sin embargo, aumentar el número de puntos en el polígono de la zona perimetral será importante para mejorar la exactitud.

Será necesario hacer campañas de concientización del cuidado y conservación de la zona protegida y su medio ambiente; además, se pueden implementar torres de vigilancia con cámaras y sensores que permitan vigilar, analizar y predecir el cambio climático y forestal; por último, en investigaciones posteriores, implementar otros índices de vegetación para poder realizar un análisis con otro enfoque.

Referencias

- Arboit, M., y Maglione, D. (2018). Análisis multi-temporal y multiespacial del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) en centros urbanos forestados y oasis irrigados, con climas secos. Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Filosofía y Letras. Instituto de Geografía; *Boletín de Estudios Geográficos*; 109; 6-2018; 13-60
- Copernicus. (6 de enero de 2022). *La mirada de Europa sobre la Tierra*. Copernicus. Obtenido de <https://www.copernicus.eu/es>
- Cruz Flores, D., Curbelo Benítez, E., y Ferrer Sánchez, Y. (2020). Variaciones espaciales y temporales en el Índice de vegetación. *Ecosistemas*, 1-12.
- Muñoz Aguayo, P. (2013). *Apuntes de teledetección: índices de vegetación*. Centro de Información de Recursos Naturales (Chile). 2013-04. CIREN. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26389>
- García, W., Centeno, Y., y Cano, M. (2 de marzo de 2022). *Desarrollo de aplicación móvil para inventario forestal usando visión artificial y geolocalización para el área natural protegida complejo San Marcelino*.

- Gonzaga Aguilar, C. (2015). *Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador*. CEDAMAZ, 30-41.
- Google Earth. (10 de agosto de 2022). Google Earth. <https://www.google.com/intl/es/earth/>
- Google Earth Engine. (10 de agosto de 2022). Conoce a Earth Engine. <https://earthengine.google.com/>
- Hernández Sampieri, R. (2014). Metodología de la investigación. México.
- Linares, J. A. (2009). *Identificación de las Áreas Críticas y sus Efectos en los Recursos Biológicos de los Ecosistemas del Área Natural Protegida Complejo San Marcelino, durante el año 2009*. Santa Ana.
- López, J. I. (1996). Análisis Dasonómico del Bosque El Imposible, Ahuachapán. San Salvador, El Salvador.
- MARN. (2017). Áreas naturales protegidas.
- MARN. (2018). Inventario nacional de bosques de El Salvador. <https://cidoc.marn.gob.sv/documentos/inventario-nacional-de-bosques-de-el-salvador/>
- Orozco, L. y Brumer, C. (2002). Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. CATIE. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/2600/Inventarios_forestales_para_bosques_latifoliados.pdf?sequence=1
- Piscoya Pérez, L. (2019). Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el Distrito de Puquina, Moquegua. Villa El Salvador: UNTELS.
- Portillo, K., y López, R. (22 de febrero de 2021). Comunidades planctónicas en América Central y México (2000 al 2020): aplicación de análisis estadísticos multivariados. <https://edicion-bioma.files.wordpress.com/2021/08/wp-1629813353571.pdf>
- REDD +. (abril de 2019). ¿Qué es REDD +? *Conservación Internacional Perú*. <https://www.conservation.org/peru/novedades/2019/10/29/qu%C3%A9-es-redd>
- Toribio, G. (2019). NDVI, ¿qué es y para qué sirve? Cursos Teledetección.com <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>