



COLEGIO DE POSTGRUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

MEDICIÓN DE LA DEFORESTACIÓN MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA EN LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA “RÍO PERICOS”, ESTADO DE SINALOA

DANIEL CABANILLAS ZAVALA

T E S I N A
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA TECNOLÓGICA EN
MANEJO SUSTENTABLE DE BOSQUES

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesina titulada: **“Medición de la deforestación mediante percepción remota en la subcuenca hidrográfica “Río Pericos” estado de Sinaloa.”** realizada por el estudiante: **Daniel Cabanillas Zavala** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA TECNOLÓGICA
EN MANEJO SUSTENTABLE DE BOSQUES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

DR. JOSÉ RENÉ VALDEZ LAZALDE

ASESOR

DR. MANUEL DE JESÚS GONZÁLEZ GUILLÉN

ASESOR

DRA. TERESA MARGARITA GONZÁLEZ MARTÍNEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, diciembre de 2022

MEDICIÓN DE LA DEFORESTACIÓN MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA EN LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA “RÍO PERICOS”, ESTADO DE SINALOA.

**Daniel Cabanillas Zavala, M.T.
Colegio de Postgraduados, 2022**

RESUMEN

La deforestación es un problema añejo que afecta progresivamente a los bienes y servicios derivados de los ecosistemas forestales de gran parte del mundo. Por ello, es importante contar con un sistema de monitoreo por parte de los organismos gubernamentales y dueños de los bosques y selvas, que les permita tomar las medidas necesarias y pertinentes para identificar y controlar las áreas deforestadas así como sus promotores. Las imágenes satelitales se han convertido en una herramienta fundamental para el monitoreo de este fenómeno. En el presente estudio se midió la deforestación en la subcuenca hidrográfica “Río Pericos”, ubicada en el Estado de Sinaloa, utilizando imágenes satelitales de la misión Sentinel 2-A en los periodos comprendidos del 1 de enero al 30 de mayo del 2019 y del 1 de enero al 30 de mayo del 2022, con la finalidad de determinar la superficie deforestada y su ubicación. Se utilizó la plataforma de Google Earth Engine para la descarga de las imágenes satelitales y el software de ArcGis 10.5 para el análisis de las mismas. Se utilizaron 89 imágenes satelitales para el periodo contemplado en el año 2019 y 104 para el periodo del año 2022, para ello, se realizaron 135 sitios de muestreo por periodo, en total 270 sitios. Los resultados obtenidos indican que se deforestaron 29,889.40 ha, en 19,972 polígonos que parten de 0.0100 ha, lo cual representa un 15.19 % de las 196,748.44 ha de la subcuenca Río Pericos, siendo el Municipio de Mocorito el más afectado con 13,510.70 ha en 7,761 polígonos con 6.87 % de deforestación. Por último, la deforestación por año fue de 9,963 con el 5.06 % ha para la subcuenca del Río Pericos, asumiendo el proceso de pérdida de la cobertura forestal.

Palabras clave: Deforestación, Sentinel 2, Imágenes satelitales, Google Earth Engine, ArcGis, percepción remota, subcuenca Río pericos.

MEASUREMENT OF DEFORESTATION THROUGH REMOTE SENSING IN THE "RÍO PERICOS" HYDROGRAPHIC SUB-BASIN, STATE OF SINALOA.

**Daniel Cabanillas Zavala, M.T.
Colegio de Postgraduados, 2022**

ABSTRACT

Deforestation is an old problem that progressively affects the goods and services derived from forest ecosystems in a large part of the world. For this reason, it is important to have a monitoring system on the part of government agencies and owners of forests and jungles, which allows them to take the necessary and pertinent measures to identify and control deforested areas as well as their promoters. Satellite images have become a fundamental tool for monitoring this phenomenon. In the present study, deforestation was measured in the "Río Pericos" hydrographic sub-basin, located in the State of Sinaloa, using satellite images from the Sentinel 2-A mission in the periods from January 1 - May 30, 2019 to January 1- May 30, 2022, in order to determine the deforested areas and their location. The Google Earth Engine platform was used to download the satellite images and the ArcGis 10.5 software for their analysis. 89 satellite images were used for the period contemplated in the year 2019 and 104 for the period of the year 2022, for this, 135 sampling sites were carried out per period, a total of 270 sites. The results obtained indicate that 29,889.40 ha were deforested, in 19,972 polygons that start from 0.0100 ha, which represents 15.19% of the 196,748.44 ha of the Río Pericos sub-basin, being the Municipality of Mocorito the most affected with 13,510.70 ha in 7,761 polygons with 6.87% deforestation. Finally, deforestation per year was 9,963 with 5.06% ha for the Pericos River sub-basin, assuming the process of loss of forest cover.

Keywords: Deforestation, Sentinel 2, satellite images, Google Earth Engine, ArcGis, remote sensing, Pericos River sub-basin.

DEDICATORIA

A mi esposa Gladys Fabiola Perea Escarrega, por animarme y acompañarme en esta meta que había dejado pendiente por varios años, y por estar pendiente en las noches de desvelo y apoyarme emocionalmente; fue un pilar para cumplir este objetivo.

A mis hijos, Ángel Daniel y Victoria Cabanillas Perea, que me prestaron de su tiempo, alegrías y comprendieron que era importante para mí terminar este estudio.

Para mis padres, Mauricia Zavala Valencia y Herminio Cabanillas López, por enseñarme a ser un luchador, honrado, humilde, como ellos y apoyarme en mis decisiones.

A mis hermanos Juan Luis, Matías y Leonel Cabanillas Zavala, por darme ese animo a seguir preparándome, estar al pendiente de mi progreso, apoyarme de diferentes formas para poder seguir con la maestría.

A mis amigos que me impulsaron a estudiar la maestría, quienes preguntaban y estuvieron al pendiente de mi progreso, y que abandoné por un tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados, al Campus Montecillo, al Postgrado Forestal y a la Maestría Tecnológica en Manejo Sustentable de Bosques, por tomar en consideración a personas que creíamos que ya no tendríamos la oportunidad de estudiar una maestría, al presentar un programa adaptado para personas con dificultades de estudiar tiempo completo.

Al Dr. José Rene Valdez Lazalde, por haber aceptado mi tema de investigación, haberme compartido su conocimiento con el mayor profesionalismo, por sus excelentes recomendaciones, aportaciones y observaciones, agradezco también su tiempo dedicado a mi investigación.

Al Dr. Manuel de Jesús González Guillén y Dra. Teresa González Martínez por aceptar y ser participe en mi tema de investigación, por la dedicación y tiempo compartido, y cabe destacar que sus aportaciones, recomendaciones y observaciones fueron esenciales.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
LISTA DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
GLOSARIO	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Justificación	3
1.3 Antecedentes	4
1.4 Pregunta de investigación	6
II. OBJETIVOS	6
2.1 Objetivo general.....	6
2.2 Objetivos específicos	6
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
3.1 Deforestación global	6
3.1.1 Deforestación en México	7
3.1.2 Deforestación en el Estado de Sinaloa.....	9
3.2 Percepción remota.....	9
3.2.1 Imágenes satelitales.....	10
3.2.2 Satélite Sentinel 2 Nivel 2A.....	14
3.2.3 Comportamiento espectral de la vegetación	15
3.3 Google Earth Engine Code Editor	16
3.4 Sistemas de Información Geográfica	19
3.5 Clasificación digital	21
3.6 Localización del área de estudio	23
3.6.1 Caracterización de la subcuenca Río Pericos.....	24
3.7 Definiciones de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable y su reglamento	32

IV.	MATERIALES Y MÉTODOS	34
4.1	Delimitación del área de estudio	35
4.1.1	Material satelital.....	36
4.2	Código de programación en la plataforma Google Earth Engine	37
4.3	Método de clasificación de terrenos en ArcGis	42
4.3.1	Clasificación de coberturas	42
4.3.1	Clasificación por máxima verosimilitud	44
4.3.2	Validación de los resultados	45
4.3.3	Vectorización	47
4.3.4	Unificación de los mapas	48
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
5.1	Discusión.....	55
VI.	CONCLUSIONES	56
VII.	LITERATURA CITADA	58
ANEXOS...	64

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Bandas del satélite Sentinel 2	12
Cuadro 2. Superficie de los municipios dentro de la subcuenca Río Pericos.	23
Cuadro 3. Uso de suelo y vegetación de la subcuenca Río Pericos	27
Cuadro 4. Clases de uso de suelo y códigos.....	43
Cuadro 5. Valores de Kappa para medir el grado de concordancia.	46
Cuadro 6. Clasificación de los terrenos, códigos y descripción del terreno.....	48
Cuadro 7. Número de polígonos y área deforestada.	49
Cuadro 8. Áreas deforestadas, cantidad de polígonos y porcentajes en los municipios estudiados.....	51
Cuadro 9. Superficie deforestada de acuerdo a los códigos y polígonos en cada municipio... ..	52
Cuadro 10. Matriz de confusión 2019.....	54
Cuadro 11. Matriz de confusión 2022.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Superficie forestal estatal.....	8
Figura 2. Imagen bajo el nivel de Sentinel-2 MSI Level 1C: ‘COPERNICUS/S2’ de la subcuenca Río Pericos.....	13
Figura 3. Imagen bajo el nivel de Sentinel-2 MSI Level 2A: ‘COPERNICUS/S2_SR’ de la subcuenca Río Pericos.....	13
Figura 4. Firmas espectrales típicas de los ecosistemas.....	15
Figura 5. Entorno de trabajo (<i>code editor</i>) de GEE y código para obtener imágenes Sentinel-2.	18
Figura 6. Modelo de datos vectoriales y ráster.	21
Figura 7. Localización del área de estudio en el estado de Sinaloa y municipios	24
Figura 8. Características generales de relieve del Estado de Sinaloa	25
Figura 9. Características de relieve de la subcuenca Río Pericos.	26
Figura 10. Uso de suelo y vegetación de la subcuenca Río Pericos	28
Figura 11. Escurrimiento natural medio superficial.....	29
Figura 12. Red hidrológica de la subcuenca Río Pericos.....	30
Figura 13. Climas en el área de estudio.	31
Figura 14. Diagrama de flujo para determinar la deforestación en la subcuenca Río Pericos.....	35
Figura 15. Imágenes satélites de Sentinel del año 2019 y 2022 de la subcuenca Río Pericos.....	37
Figura 16. Datos de las normales climatológicas de la estación meteorológica numero 00025075 en la subcuenca Río Pericos.....	40
Figura 17. Comparativa de las diferentes clases de terrenos en la subcuenca Río Pericos.	43
Figura 18. Clasificación por máxima probabilidad.....	45
Figura 19. Plano de pérdida cobertura forestal (2019-2022).	50
Figura 20. Deforestación por municipio en la subcuenca Río Pericos.	53

GLOSARIO

AOI: Área de Influencia o Área de Interés

Banda. Cada uno de los intervalos en los cuales se divide el espectro electromagnético en una imagen de sensor remoto.

Corrección geométrica. Consiste en vincular una región de una imagen con una correspondiente región de otra imagen, la cual es tomada con un sensor diferente o un ángulo de vista diferente. Permite corregir la posición relativa del píxel, la cual se modificó por la geometría del sensor o por variaciones en el terreno.

Corrección radiométrica. Considera las variaciones en la intensidad del píxel (niveles digitales) causados por el objeto o la escena que se escaneó (mal funcionamiento del sensor, efectos atmosféricos o efectos topográficos).

Datum. Superficie en la cual se referencian todas las coordenadas (X, Y, Z), tiene asociado un elipsoide específico y uno o más puntos materializados sobre la superficie terrestre.

Espectro electromagnético. Distribución energética, medida en función de la frecuencia, del conjunto de las ondas electromagnéticas que van desde los rayos gamma y rayos X hasta las ondas de radio, pasando por el espectro térmico responsable del calor que percibimos y que no son directamente perceptibles por el ser humano. Estas formas energéticas pueden reflejarse en la superficie terrestre y ser capturadas por el sensor del satélite proporcionando información sobre sus características, tal y como lo hacen las ondas del espectro visible. La energía se mide en micrómetros.

Formato Raster o Matricial. Estructura de almacenamiento de información espacial conformada por celdas del mismo tamaño, ordenadas en filas y columnas, localizadas en coordenadas contiguas, implementadas en una matriz 2D. Cada celda, llamada también elemento de imagen, elemento matriz o píxel, es referenciada por índices de filas (o líneas) y columnas y contiene un valor numérico representando el nivel digital y unas coordenadas que la ubican espacialmente.

Formato TIFF (Tagged Image File Format). Formato de fichero para gráficos de mapas de puntos. Almacena las imágenes mediante la descripción de información en bloques o marcas. Cada marca describe un atributo de la imagen o un desplazamiento desde el principio del fichero hasta una cadena de píxeles. Actualmente es un estándar de calidad que se suele emplear en trabajos de imagen impresa.

GEE: Google Earth Engine

Georreferenciación. Proceso mediante el cual se asignan coordenadas con una proyección y Datum específicos a un objeto o superficie en el plano en un archivo raster (imagen) o vectorial (líneas).

GeoTIFF: Archivos geográficos

GIS: Sistema de Información Geográfica

Intensidad. Luminancia de una celdilla, nivel equivalente de gris en una gama acromática de tonos. Hace referencia este concepto al grado de claridad o luminosidad de la celda.

Imagen multispectral. Producto espacialmente explícito generado por un sensor remoto mediante la combinación de imágenes que se registran en diferentes longitudes de onda o bandas espectrales.

Imagen de satélite. Representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen información reflejada para la superficie de la tierra que luego es enviada a la Tierra y que procesada convenientemente entrega valiosa información sobre las características de la zona que cubre.

Muestreo intencional: Permite seleccionar casos característicos de una población limitando la muestra sólo a estos casos. Se utiliza en escenarios en las que la población es muy variable y consiguientemente la muestra es muy pequeña.

Nivel Digital –ND–. Se trata del valor numérico discreto asignado por el sistema formador de imágenes a cada celda, en respuesta a la irradiancia recibida sobre el plano focal del sensor. Se le conoce como nivel de gris, luminancia, número digital, valor de pixel, etc. Existe una relación lineal entre el ND grabado y la radiancia correspondiente a cada celda de terreno.

Píxel (Picture Element). Unidad básica de información gráfica que se refiere a cada uno de los puntos indivisibles que conforman una imagen, es decir, la mínima área de captura en el formato Raster. A mayor densidad de píxeles, mayor calidad de imagen.

Proyección geográfica. Sistema ordenado que traslada desde la superficie curva de la Tierra la red de meridianos y paralelos sobre una superficie plana. Se representa gráficamente en forma de malla.

Resolución. Nivel de detalle con el que se es posible identificar los elementos sobre las imágenes y se relaciona con la unidad mínima de almacenamiento de datos o píxel.

Resolución espacial. Este concepto designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre la imagen; suele medirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la imagen. Se mide en unidades de longitud definida como el número de píxeles por unidad de medida (milímetros sobre la imagen o metros sobre el terreno) y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie.

Resolución espectral. Longitudes de onda en las cuales un sensor es capaz de adquirir información. La fotografía puede ofrecer películas pancromáticas, infrarrojo blanco negro, color natural o infrarrojo color

UTM: Sistema de coordenadas geográficas

WGS-84: Sistema Geodésico Mundial 1984

I. INTRODUCCIÓN

La deforestación se define como la conversión de los bosques a otro tipo de uso del suelo, independientemente si es inducida o no por humanos. Es un fenómeno eminentemente antrópico que afecta al medio ambiente, repercute en el cambio climático, en el ciclo del carbono y en la biodiversidad (Monjardín et al. 2017). Kanninen et al. (2007) argumentan que tasas altas de deforestación en bosques tropicales y matorrales tienen consecuencias severas como la ocurrencia de inundaciones y la degradación de los suelos. Además, amenaza y disminuye las formas de vida y a la integridad cultural de la gente que depende directamente de ellos.

El desarrollo de tecnologías satelitales hace posible analizar el cambio de las características de la superficie terrestre en diferentes partes del mundo a través de diferentes misiones satelitales. Estas permiten generar mapas en áreas diversas de investigación como estudios de subsidencia (Siles et al. 2015; Yang et al. 2019; Ziwen et al. 2019), potenciales deslizamientos de tierra (Zhang et al. 2021; Liang et al. 2022), sismicidad (Pepin et al. 2022; Maubant et al. 2022), así como en el monitoreo de las áreas forestales y sus cambios (Pulella et al. 2020; Carstairs et al. 2022; Dal Molin & Rizzoli, 2022).

En el presente estudio se analizaron imágenes satelitales de la misión Sentinel 2-A para monitorear y registrar cambios en la cobertura de vegetación forestal de las áreas forestales de la subcuenca hidrográfica Río Pericos durante el periodo de 2019 a 2022. El análisis permitió identificar las áreas deforestadas durante el periodo lo que podría ser útil para que las autoridades federales y los dueños de los bosques, tomen las medidas que consideren pertinentes.

1.1 Planteamiento del problema

De acuerdo con la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2020 de la FAO (2021) desde 1990 se han deforestado 420 millones de ha de bosque en todo el mundo. Según National Geographic Society (2021), en los últimos 50 años se ha producido la mayor deforestación en la historia de la humanidad, misma que representa el 15 % de la superficie mundial de vegetación, equivalente al territorio de España, Portugal y Francia. Además, las cifras del informe “Frentes de deforestación: causas y respuestas en un mundo cambiante”, indican que en los últimos 13 años, la deforestación ha arrasado 43 millones de ha, acabando con bosques y selvas de forma masiva y causando un inmenso daño a la calidad de los suelos (National Geographic Society,

2021). La WWF (Fondo mundial para la naturaleza), identifica en América Latina, a la ganadería y agricultura comercial principalmente con el cultivo de soya; en Asia, a las plantaciones para pulpa de papel y palma; y en África, a la agricultura de subsistencia como una de las principales causas de la deforestación (National Geographic Society, 2021).

Desde varias décadas atrás se sabe que los cambios de cobertura y de uso de suelo, así como las altas tasas de deforestación, tienen consecuencias severas e influyen directamente en los cambios del clima a nivel global, además de contribuir a la pérdida de biodiversidad y provocar el aumento y la intensidad de los desastres naturales en todo el planeta como son los incendios, inundaciones, sequías, aumento de gases que incrementan el efecto invernadero, etc. (Chuvieco, 2010).

Los organismos encargados de la conservación forestal tienen la tarea de presentar alternativas para el manejo forestal sostenible con la finalidad de conservar la integridad de estos recursos. Sin embargo, el tiempo transcurrido entre el proceso de deforestación y la toma de decisiones en ocasiones es demasiado, y la sobreexplotación de los recursos forestales avanza a tal grado que la comercialización de estos recursos y sus derivados ocasiona una pérdida en la diversidad de flora y fauna en distintas zonas del país. Por otro lado, la tala inmoderada e ilegal, son cada vez más comunes en la actualidad, y esto hace que no se tenga un control en el manejo de dichos recursos (Madrid et al. 2009).

Debido a la posición geográfica que ocupa en la tierra, a su fisiografía y altitud, la influencia de corrientes marinas y a estar ubicado en un lugar de transición entre las regiones Neártica y Neotropical, México es considerado un país mega diverso ecológicamente y por sus características físicas. Sin embargo, no es ajeno a la problemática antes expuesta. El uso intensivo y desordenado que los habitantes del país realizan de los ecosistemas para la obtención de bienes y servicios, aunado a los cambios de uso de suelo para realizar actividades agrícolas y ganaderas extensivas, entre otras, está alterando la salud y el mal funcionamiento de los ecosistemas para la producción de bienes y servicios lo que repercute en el bienestar social y económico de la población (Jiménez et al. 2014).

1.2 Justificación

El monitoreo de la deforestación debería de ser un tema importante en los ámbitos gubernamental, académico y social debido a las implicaciones que tienen los cambios de usos de suelo principalmente para la sostenibilidad, conservación de la biodiversidad y servicios ambientales que proveen los bosques. La percepción remota y los sistemas de información geográfica (SIG) han mostrado tener la capacidad necesaria para la obtención oportuna y económica de datos que son vitales para el desarrollo y conocimiento de las cuestiones geográficas de un país. Además, estas tecnologías están en constante evolución, entre las cuales se destacan el uso de datos satelitales de alta resolución y aplicaciones de código abierto para la caracterización forestal, la estimación de la biomasa y la evaluación del cambio histórico de la cobertura forestal (Romijn et al. 2015).

En México, existen diversos estudios científicos acerca de la cuantificación de la deforestación, los cuales se han realizado con diferentes objetivos, métodos e insumos. La CONAFOR (2020) revela que el monitoreo de la deforestación, en cuya metodología se encuentra implícito el uso de los productos cartográficos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), representa dificultades importantes. Dentro de ellas, se mencionan las asociadas a la falta de certeza respecto de la continuidad sistemática y periódica para la actualización de las cartas de Uso de Suelo y Vegetación (USyV) y a las limitaciones que tiene esta cartografía para detectar los cambios en la cobertura forestal. Lo anterior, debido a su baja resolución espacial y temporal, así como por la alta incertidumbre de los mapas de cambios que son generados mediante el traslape geométrico de dichas cartas.

Según la Secretaría de Gobernación, 95 % de la deforestación ocurre de manera ilegal, pues la SEMARNAT solamente autoriza el cambio de uso del suelo a un promedio de 12 a 13 mil ha al año, mientras que la deforestación bruta promedio anual es de 250 a 260 mil ha (SEGOB, 2020). Debido a este tipo de acciones, diversos países han desarrollado iniciativas para el monitoreo de sus recursos forestales y la estimación de la deforestación (CONAFOR, 2020), con la finalidad de producir información sobre los cambios en la cobertura forestal. Esta información es un insumo básico para apoyar en la gestión de las políticas públicas y la toma de decisiones dirigidas a la conservación, protección, restauración y manejo sostenible de los ecosistemas forestales.

Específicamente, la región norte de México, ha sido ampliamente afectada por el cambio de uso de suelo provocado por la producción agrícola y ganadera. En este sentido, en el presente estudio se propone una alternativa para medir la deforestación en la subcuenca hidrográfica Río Pericos, ubicada en el estado de Sinaloa. Lo anterior, a través de imágenes satelitales de la misión Sentinel 2-A y utilizando herramientas de procesamiento disponibles para los sectores gubernamentales como ArcGis 10.5. El propósito es ensayar una metodología que permita monitorear el proceso de deforestación en periodos en que las autoridades lleven a cabo las acciones necesarias para mitigar o disminuir en gran medida esta problemática. La gestión forestal, incluida la reducción y prevención de la deforestación, es una importante estrategia de mitigación climática y ayuda a asegurar las diferentes funciones de los bosques (Bonan, 2008b).

1.3 Antecedentes

Las tecnologías satelitales, principalmente el uso de la percepción remota o teledetección, ha sido de gran ayuda en las últimas décadas para el estudio de la deforestación en todo el mundo, ya que es un apoyo muy conveniente para reducir los costos o el tiempo invertido en obtener resultados para el estudio del ambiente (Chuvienco, 1996, 2008), lo cual depende, evidentemente, del nivel de detalle que se requiera en el análisis. Sin embargo, se debe de tener cuidado en la implementación de las estrategias utilizadas. Por ejemplo, Monjardín et al. (2017) mencionan que los resultados obtenidos de la cartografía de pérdida de cobertura de bosques y selvas puede sobreestimar o subestimar las superficies deforestadas debido al nivel de detalle que presenta la cartografía de USyV a escala 1:250,000. En tal sentido, es recomendable trabajar con escalas que van de 1:50,000 a 1:25,000.

Algunos estudios realizados en los trópicos que utilizaron datos de teledetección global han dado a conocer una disminución de los bosques de esta región (DeFries et al. 2002; Hansen et al. 2013). Datos de la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales (FRA) 2015 muestran que la tasa anual de pérdida neta de bosques en los trópicos se ha reducido en comparación con la década de 1990 con 9.5 millones de ha por año y en la década del 2000 con 7.2 millones de ha por año (Keenan et al. 2015). Las estimaciones indican una disminución de 5.5 millones de ha de bosques por año entre 2010 y 2015.

Algunos de los métodos que se han utilizado para la detección del cambio de uso de suelo se basan principalmente en el uso de los sensores remotos, los cuales han demostrado ser un medio eficaz y eficiente para dicho fin, y que a su vez, proporcionan una visión global de la dinámica espacio-temporal de la cobertura y los patrones del uso del suelo, lo cual contribuye al planteamiento de políticas de desarrollo regional (Treitz y Rojan, 2004). Es así que diversos estudios se han desarrollado a través del uso de diferentes técnicas con la finalidad de monitorear la deforestación, el cambio de uso de suelo en terrenos forestales, incendios forestales e inundaciones.

En muchos de los países de Latinoamérica se ha utilizado el enfoque wall-to-wall (pared a pared) y se han producido mapas de cobertura y cambios de cobertura forestal con suficiente calidad para monitorear el proceso de deforestación, el cual es asistido con percepción remota y sistemas de información geográfica. Algunos países como Panamá y Nicaragua han utilizado un método para la estimación de la deforestación, basado en la detección de cambios temporales mediante la interpretación visual de una malla sistemática de muestreo asociada a sus inventarios forestales nacionales. Este método de muestreo sistemático ha tomado relevancia en los últimos años debido a su relación costo-eficiencia respecto a los enfoques wall-to-wall, además de que los cálculos presentan mejores niveles de precisión. La implementación del enfoque de muestreo sistemático se basa en el uso de herramientas de acceso libre como son Collect Earth y Open Foris Collect, desarrolladas por la FAO, y Google Earth Engine (CONAFOR, 2020). Es así que la CONAFOR declara, con base en datos de la FAO, que el uso de enfoques de muestreo para el monitoreo de la deforestación bruta en el marco de la elaboración de NREF (Nivel de Referencia de Emisiones Forestales) ante la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático), se ha incrementado de manera notable en los últimos años. En particular, en el año 2018, 30 % de los NREF/NRF enviados a la CMNUCC utilizaron el enfoque de muestreo para reportar tasas de deforestación.

La CONAFOR (2020) ha estado implementando un enfoque de monitoreo continuo y preciso para México que permita conocer las zonas críticas de deforestación a distintos niveles del país. Desde 2012 ha venido trabajando en el desarrollo e implementación de un sistema asistido por percepción remota para mejorar el monitoreo y análisis de la cobertura forestal de México. En 2016, creó la Gerencia de Sistema Nacional de Monitoreo Forestal (GSNMF), con la finalidad de

institucionalizar y conjuntar las iniciativas para el monitoreo de los recursos forestales de México, de manera organizada y programática.

1.4 Pregunta de investigación

¿Es posible estimar la deforestación en la subcuenca Río Pericos mediante imágenes satelitales multispectrales Sentinel 2, entre enero a mayo del año 2019 y enero a mayo del año 2022?

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Cuantificar la deforestación mediante percepción remota en la subcuenca hidrográfica “Río Pericos” estado de Sinaloa, del 1 de enero al 30 de mayo del 2019 y del 1 de enero al 30 de mayo del 2022.

2.2 Objetivos específicos

- Diseñar una metodología factible de ser adoptada por diferentes organismos gubernamentales para la detección de las deforestaciones a corto plazo.
- Determinar la superficie y ubicación de polígonos deforestados durante 3 años en la subcuenca hidrográfica Río Pericos, mediante el análisis multitemporal de imágenes del satélite Sentinel-2A en ArcGis 10.5.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Deforestación global

En la actualidad, alrededor de un tercio de la superficie terrestre está cubierta por bosques que almacenan alrededor del 45 % del carbono terrestre del mundo en forma de madera, hojas, raíces y suelo. Casi la mitad de esta superficie está formada por bosques tropicales que, en promedio, pueden almacenar un 50 % más de carbono en comparación a los árboles de otros tipos de bosques (Bonan, 2008a). Se ha estimado que la deforestación aporta aproximadamente entre 10 y 20 % de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (Pacheco et al. 2012). Además de desempeñar uno de los roles más importantes en la regulación del clima, los bosques

brindan una variedad de funciones para las personas y el planeta en la parte ecológica, económica, social y estética (Miura et al. 2015).

La deforestación es un proceso natural o inducido realizado desde hace siglos. Según National Geographic Society (2021), en uno de los informes del WWF por sus siglas en inglés (Fondo Mundial para la Vida Silvestre), indica que los bosques todavía cubren alrededor del 30 % de las regiones del mundo, pero franjas del tamaño de Panamá se pierden ineludiblemente cada año. Según esta misma organización, España provoca la deforestación de 32,900 ha de selva cada año y la Unión Europea es responsable del 16 % de la deforestación tropical importada. A este ritmo, las selvas tropicales y los bosques pluviales podrían desaparecer completamente dentro de cien años si continúa el ritmo actual de deforestación.

De acuerdo a la Fundación Vida Silvestre Argentina (2022), alrededor de 13 millones de ha de bosques nativos del mundo desaparecen anualmente, lo que equivale a una vez y media la Ciudad Autónoma de Buenos Aires por día. Con la deforestación desaparece la diversidad de especies que albergan y desaparecen o se reducen, significativamente, algunos de los beneficios directos que los bosques brindan a la sociedad. Los bosques contienen el 65 % de la diversidad biológica terrestre del planeta, aportan a las poblaciones humanas fuentes de proteínas, plantas medicinales y materiales para la construcción y combustible. En forma indirecta, contribuyen a la conservación de las fuentes de agua, la prevención de inundaciones y protección de los suelos. El sustrato inferior del bosque (ocochal) actúa como una esponja al absorber el agua producto de la precipitación durante las tormentas tropicales, la retiene e infiltra en los suelos para posteriormente ser liberada a través del tiempo.

3.1.1 Deforestación en México

México cuenta con aproximadamente 1.96 millones de km² de territorio nacional total, y según la CONABIO (2020), 70 % del territorio mexicano está cubierto por vegetación forestal, situándolo en el número 15 y 17 a nivel mundial, lo que se refleja en 1.38 millones de km² de superficie que es cubierta por bosques, selvas, mangles, zonas áridas y semiáridas, entre otros ecosistemas. La superficie arbolada en su conjunto ocupa el 48 % de esa superficie forestal, lo que equivale a 660 mil km², que es en donde se concentra una alta biodiversidad y la presencia de la mayoría de las especies maderables.

De acuerdo con Madrid et al. (2009), la superficie forestal del país se concentra mayoritariamente en ocho estados que cuentan con 60 % de ésta y son (de mayor a menor): Chihuahua (14,484,612-16,527,058 ha), Sonora, Coahuila y Durango (6,726,936-14,484,611 ha), Baja California Sur, Oaxaca, Baja California y Campeche (4,251,085-6,726,935) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Sin embargo, en el marco del FRA de la FAO, se reportó para México una pérdida neta de superficie forestal de 190,000 ha/año entre 1990 y 2000; de 136,000 ha/año entre 2000 y 2010; 92,000 ha/año entre el periodo de 2010 y 2015; y finalmente, una tasa de deforestación de 127,770 ha/año para el periodo 2015-2020 (CONAFOR, 2020).

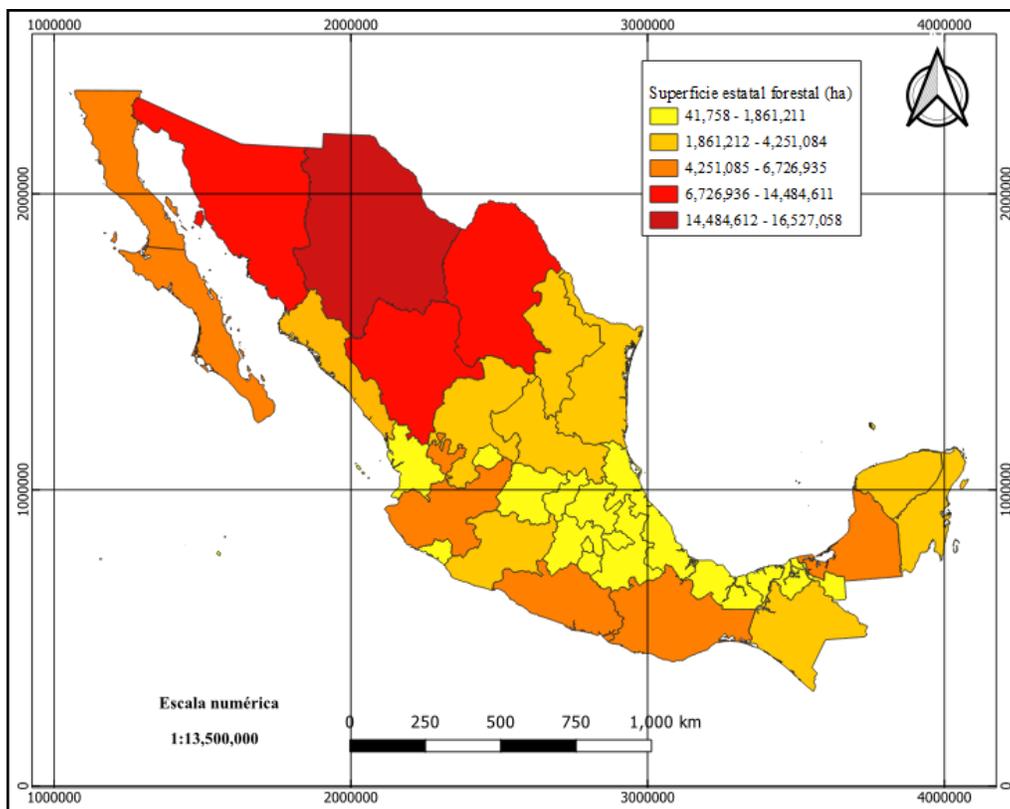


Figura 1. Superficie forestal estatal (Madrid et al. 2009).

Algunos estados tienen una superficie forestal muy grande, aunque no representa un porcentaje tan importante de su superficie estatal total. En cambio, hay otros estados que no son los de mayor superficie forestal en términos reales, pero ésta sí ocupa un gran porcentaje de todo su territorio estatal. Así, los estados que tienen la mayor parte de su territorio ocupado por

superficie forestal son: Quintana Roo, Baja California Sur, Baja California, Coahuila y Campeche (Madrid et al. 2009).

3.1.2 Deforestación en el Estado de Sinaloa

Monjardín et al. (2017) manifiestan que los resultados de la detección de cambios mediante el uso de la cartografía de cobertura de bosques y selvas de los años 1993 y 2011 indican que existe una gran pérdida de cobertura forestal en el estado de Sinaloa, con una tasa media anual ligeramente superior a la del país. Para el año 1993, Sinaloa poseía una superficie de 30,377 km² de cobertura, es decir, 52.95 % del territorio del estado, mientras que para el 2011, esta misma cobertura mostró una superficie de 28,100 km², lo que representó 48.98 %. Los municipios de Badiraguato, Culiacán, El Fuerte, Cósala y Mocorito son prioritarios para tomarse en cuenta en proyectos de reforestación y conservación por tener grandes pérdidas forestales y altas tasas de deforestación a nivel municipal, según el análisis municipal de pérdida forestal y sus tasas estimados por este mismo autor.

3.2 Percepción remota

La percepción remota o teledetección es la adquisición de información desde una distancia específica sobre objetos o áreas mediante el uso de radiación electromagnética (luz) sin estar en contacto directo con éstos (Jong et al. 2004). Lillesand et al. (2015) la definen como la ciencia y las técnicas de adquisición de información sobre un objeto, un área terrestre, un fenómeno o un proceso eco-sistémico utilizando una tecnología que no está en contacto directo con el objeto, la región o el fenómeno bajo investigación, y que a la vez, es una técnica aplicada que, a través de tiempo y el espacio, permite obtener información sobre dichos objetos (Chuvienco, 1996).

La percepción remota de un ambiente terrestre puede realizarse mediante diferentes alternativas, dependiendo de la distancia entre el sensor y el objetivo, se pueden identificar categorías de plataformas: drones, globos, aviones y satélites (Reuter, 2009). No obstante, con el uso de los satélites como plataformas de percepción remota, ha sido posible superar algunas de las dificultades enfrentadas en la percepción remota con aviones, ya que los satélites pueden monitorear la superficie total de la tierra sobre bases periódicas, cubriendo una sección suficientemente grande en cada revolución.

Los métodos de detección están basados en datos multitemporales, multiespectrales y en sensores satelitales que han demostrado gran potencial para detectar, identificar, cartografiar y monitorear los cambios de diferentes ecosistemas independientemente de sus agentes causales (Coppin et al. 2004). Por ello es deseable emplear y comparar varias técnicas, algoritmos y análisis que permitan identificar las zonas exactas de detección (Congalton y Green, 1999) y así definir la mejor opción para la detección del cambio considerando las características físicas, sociales y económicas del lugar.

Actualmente, el uso de las tecnologías de percepción remota ha ganado notoriedad gracias a la facilidad con la que se pueden realizar estudios y monitoreo de las actividades forestales de una región, ya que estas técnicas constituyen un conjunto de instrumentos que permiten la obtención, medición y registro de información a distancia, además de ofrecer una cobertura global y periódica de la superficie terrestre con una visión panorámica y homogénea en la toma de datos (Karszenbaum, 2005) y que, además, dependen de diferentes factores que pueden determinar la metodología a emplear, tales como la información con la que se cuenta o el objetivo de estudio y los recursos disponibles (Romero y López, 2000). Aunado a esto, las nuevas técnicas para adquirir, procesar y gestionar grandes cantidades de datos de percepción remota incluyen bases de datos basadas en la nube y plataformas de procesamiento de datos que ofrecen espacio para grandes conjuntos de datos y recursos computacionales para el procesamiento.

La percepción remota es una disciplina que integra los desarrollos más recientes en observación, exploración y monitoreo del planeta tierra. Los sensores remotos cumplen la misión de ofrecer información en diferentes regiones del espectro electromagnético, lo cual permite caracterizar objetos en la superficie terrestre dependiendo de la región que se trabaja y es una fuente de información relevante para estimar variables biofísicas como por ejemplo la temperatura (Calzada, 2016).

3.2.1 Imágenes satelitales

A medida que los satélites con sensores pasivos avanzan en su órbita, "barren o escanean" la superficie terrestre captando la energía del sol reflejada por ésta en distintas longitudes de onda. Éstas son agrupadas en distintos intervalos a los que se les conoce como "bandas espectrales". Los sensores, al codificar esta información para cada banda en un formato posible de interpretar

por los expertos, generan matrices digitales de píxels -elementos pictóricos- (del inglés, picture x element) que en su conjunto constituyen una imagen o también denominado como "raster". En el lenguaje del procesamiento de imágenes son denominados ND (Nivel Digital) (NASA, 2004).

Las imágenes Sentinel 2 son proporcionadas en dos niveles de pre-procesamiento: Sentinel 2A y Sentinel 2B, con una resolución de 10 m en el visible y disponibles para descarga de manera gratuita. Con sus 13 bandas espectrales es posible generar visualizaciones a color natural y falso color o componer índices espectrales a máxima resolución (Gisadminbeers, 2019b).

Gis & Beers (2020) indican que para obtener la imagen que más se adapte a las necesidades, se debe de analizar la resolución, el momento temporal, condiciones meteorológicas, bandas de análisis o la finalidad de la imagen.

Resolución temporal de Sentinel 2

Cada satélite obtiene imágenes territoriales de manera recurrente en periodos temporales diferentes, por lo que se debe analizar qué satélites tomaron la imagen del día que se necesita o si se busca varias imágenes cuya recurrencia de toma se ajuste a los intervalos temporales que se necesitan.

Condiciones meteorológicas

Las nubes, la lluvia y la humedad impiden la correcta visualización de los elementos territoriales en las imágenes. Por ende, disponer de una imagen de satélite del día exacto que se necesita, no garantiza que sea apropiada para su uso. La principal limitante en las imágenes ópticas convencionales es la presencia de nubes, impidiendo la visualización y análisis adecuado de los objetos por debajo de ellas (Gisadminbeers, 2020).

Bandas de análisis

Las imágenes Sentinel 2 están formadas por 13 bandas que operan desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR). Aunque Sentinel 2A y Sentinel 2B mapean de manera común, el ancho espectral entre ambos es ligeramente diferente. Las bandas trabajan a lo largo del espectro visible, el borde rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta para procesar diferentes bandas de trabajo para el análisis (Gisadminbeers, 2019b).

Cuadro 1. Bandas del satélite Sentinel 2 (Gisadminbeers, 2019b).

Tipos de bandas	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1 - Aerosol	0.43 - 0.45	60
Banda 2 - Blue	0.45 - 0.52	10
Banda 3 - Green	0.54 - 0.57	10
Banda 4 - Red	0.65 - 0.68	10
Banda 5 - Red edge 1	0.69 - 0.71	20
Banda 6 - Red edge 2	0.73 - 0.74	20
Banda 7 - Red edge 3	0.77 - 0.79	20
Banda 8 - Near Infrared (NIR) 1	0.78 - 0.90	10
Banda 8A - Near Infrared (NIR) 2	0.85 - 0.87	20
Banda 9 - Water vapour	0.93 - 0.95	60
Banda 10 - Cirrus	1.36 - 1.39	60
Banda 11 - SWIR 1	1.56 - 1.65	20
Banda 12 - SWIR 2	2.10 - 2.28	20

Los resultados a resoluciones de 10, 20 y 60 m, estarán limitados por las combinaciones de bandas a falso color, mientras que las composiciones a color natural proveerán imágenes en la mayor resolución de 10 m (Gisadminbeers, 2019b).

Las imágenes habituales de Sentinel son proporcionadas bajo dos niveles:

Sentinel 2 Nivel 1C: imágenes corregidas atmosféricamente por arriba de la atmósfera (TOA).

Sentinel 2 Nivel 2A: imágenes corregidas atmosféricamente a nivel del suelo (BOA). Son las que ayudan a mejorar el aspecto visual y jugar con valores libres de la influencia de la atmósfera.

Las imágenes de nivel 2A, a diferencia de las de nivel 1C, ofrecen datos de reflectancia más próximos a la realidad y con niveles de color más realistas, debido a la presencia de la atmósfera y la presencia de vapor de agua. Las imágenes de nivel 2A son más nítidas, con mayor brillo, contraste y no presentan la textura blanquecina producida por el efecto de la presencia de la atmósfera (Gisadminbeers, 2019b).

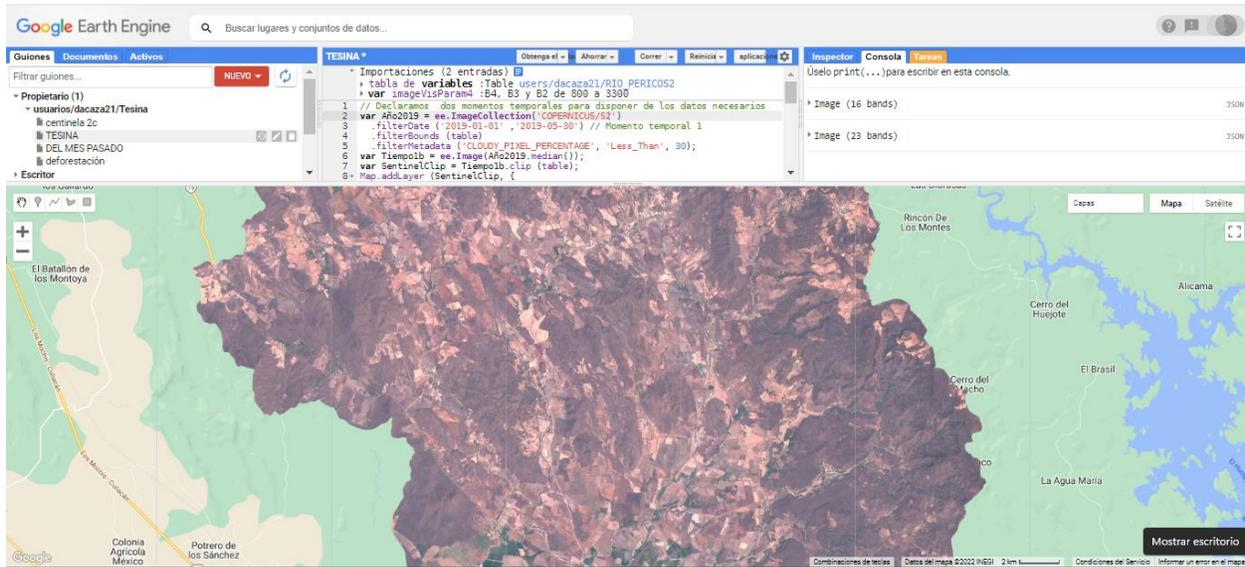


Figura 2. Imagen bajo el nivel de Sentinel-2 MSI Level 1C: ‘COPERNICUS/S2’ de la subcuenca Río Pericos

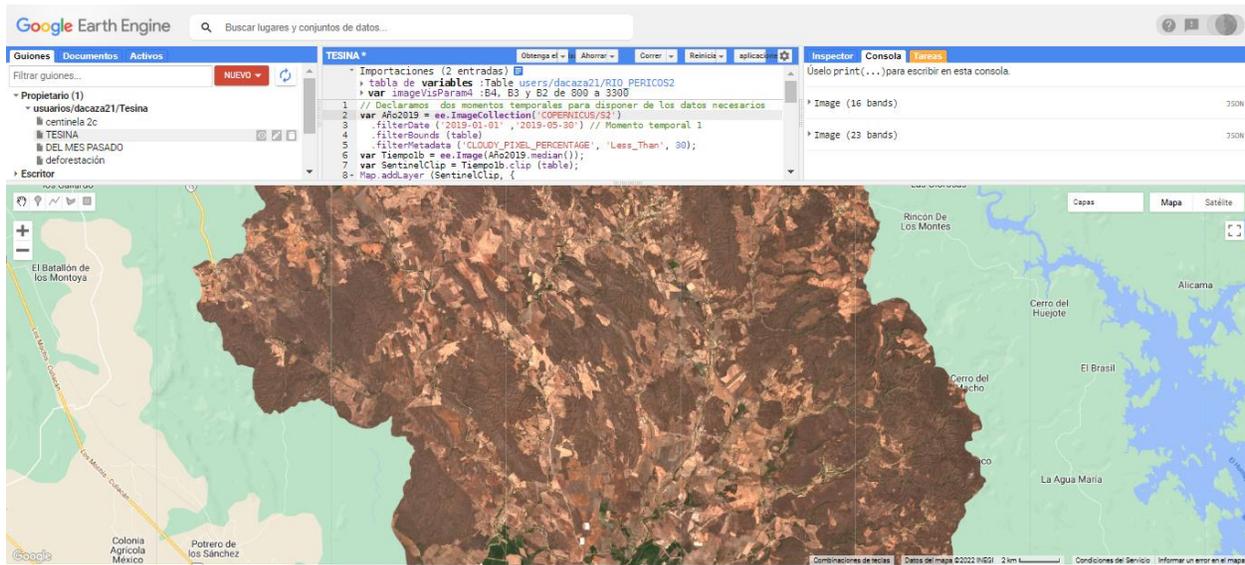


Figura 3. Imagen bajo el nivel de Sentinel-2 MSI Level 2A: ‘COPERNICUS/S2_SR’ de la subcuenca Río Pericos

Las imágenes de las figuras 2 y 3 están bajo el mismo análisis, es decir, son del mismo periodo de tiempo (1 de enero al 30 de mayo de 2019), misma ubicación, sin embargo, la primera está bajo el nivel de Sentinel-2 MSI Level 1C: ‘COPERNICUS/S2’ donde se observa más blanquecina por los efectos de la presencia de la atmosfera y del vapor de agua. Caso contrario,

la segunda imagen se encuentra bajo el nivel de Sentinel-2 MSI Level 2A: 'COPERNICUS/S2_SR', observándose más nítidas, con mayor brillo, contraste y no presentan la textura blanquecina.

3.2.2 Satélite Sentinel 2 Nivel 2A

La Comisión Europea (2018) menciona que a partir de marzo de 2018, el Satélite Sentinel 2 Nivel 2A se convirtió en un producto operacional. Inició con la cobertura de la región euromediterránea y tuvo un aumento gradual a la cobertura mundial sistemática en diciembre de 2018. El Nivel-2A de Sentinel-2, L2A Product Definition Document, es una ortoimagen expresada en valores de reflectancias a nivel de la superficie (BOA).

Sentinel nivel 2A es una misión de observación de la Tierra del Programa Copernicus que adquiere sistemáticamente imágenes ópticas a resolución espacial alta (10 m, 20 m y 60 m) sobre la tierra y aguas costeras. La misión de los satélites Sentinel nivel 2A es proporcionar información útil para el monitoreo continuo de la Tierra, principalmente para las áreas agrícolas y forestales. Según The European Space Agency (2015), los satélites Sentinel 2 entregan imágenes ópticas de alta resolución para la vigilancia medioambiental, monitoreo terrestre, respuesta a emergencias y servicios de seguridad. Esta misión satelital se encuentra conformada por dos satélites idénticos en la misma órbita (Sentinel 2A y Sentinel 2B), separados por 180 grados, para lograr una cobertura y una descarga de datos óptimos, cubriendo la misma zona en un periodo de cinco días.

Los productos de Nivel-2A, es una evolución del Nivel 1C en el que se aplican correcciones atmosféricas para proporcionar las ortoimágenes con niveles digitales expresados en valores de reflectancia reales a nivel de superficie (BOA, Bottom-Of-Atmosphere reflectances). En el producto incluye un mapa de clasificación que contempla las siguientes clases: nubes, sombras de nubes, vegetación, suelos/desiertos, agua, nieve, etc. Este producto posee unas dimensiones de 100 km x 100 km y ocupa un volumen de almacenamiento medio de 800 MB (Comisión Europea, 2018).

3.2.3 Comportamiento espectral de la vegetación

Gates et al. (1965) comentan que el comportamiento espectral teórico de la vegetación sana (Figura 4) muestra una reflectividad reducida en las bandas visibles debido al efecto absorbente de los pigmentos de clorofilas, xantofilas y carotenos, captando la radiación situada en torno a los $0.445 \mu\text{m}$. También indican que la clorofila presenta una segunda banda de absorción cercana a los $0.645 \mu\text{m}$. Entre ambas porciones del espectro, aparece una banda intermedia, alrededor de los $0.55 \mu\text{m}$, en donde el efecto absorbente es menor, mostrando así un máximo relativo de reflectividad. El infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad debido principalmente a la estructura celular interna de las hojas, mientras que a $1.45 \mu\text{m}$ el efecto absorbente del agua provoca una drástica reducción de la reflectividad y se reduce paulatinamente hacia el infrarrojo medio; esta absorción también se produce a los $1.92 \mu\text{m}$ y $2.7 \mu\text{m}$.

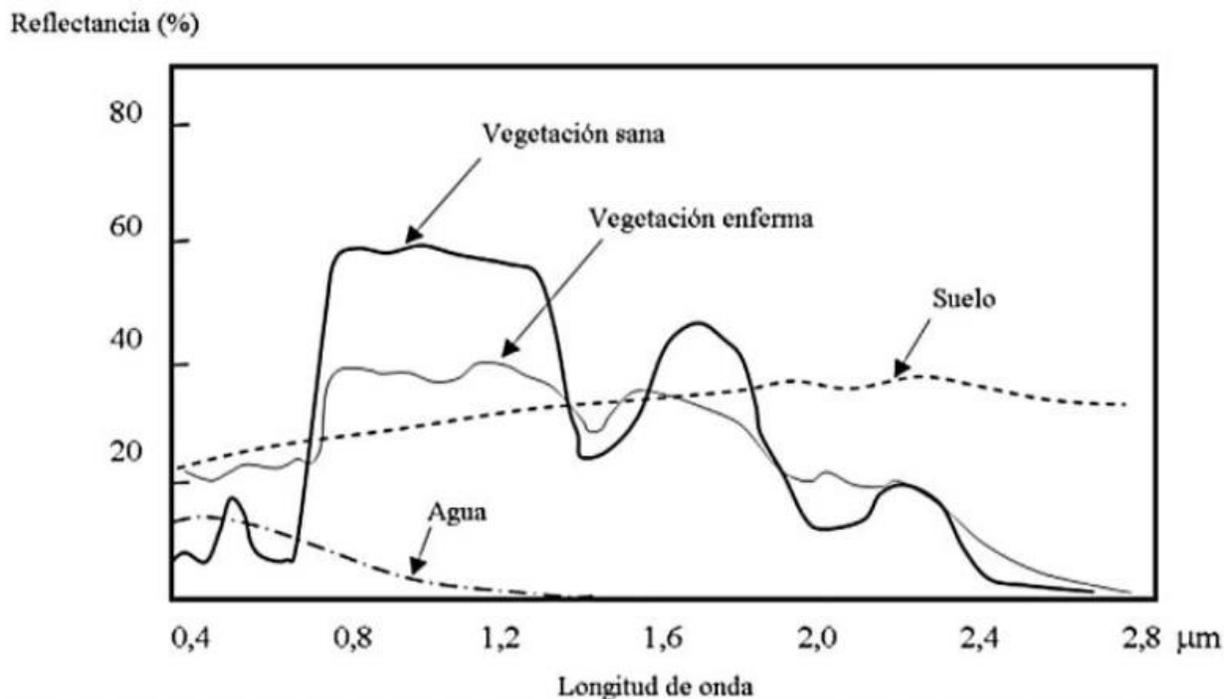


Figura 4. Firmas espectrales típicas de los ecosistemas (Hernández, 2016).

3.3 Google Earth Engine Code Editor

Morales (2020) menciona que Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>) es una herramienta para analizar información geoespacial. Se puede analizar la cobertura de bosques y agua, el cambio de usos de uso de suelo, evaluar la salud de los campos agrícolas, etc.

Google Earth Engine permite para este tipo de estudios:

- Cargar datos vectoriales para el análisis de deforestación.
- Accesar a su catálogo de datos para visualizar y descargar los datos proporcionados por el satélite de Sentinel 2.
- Realizar el análisis en la aplicación Arcgis para obtener resultados.
- Realizar investigación, usarse para la educación y para usos sin ánimo de lucro.
- Proporciona dos API (application programming interface) gratuitas (API de JavaScript y API de Python) que permiten el análisis de grandes conjuntos de datos.

Actualmente existe una enorme cantidad de información satelital obtenida a escala global, recopilada por diferentes sensores que pertenecen a diferentes proyectos o agencias. Sus datos son de diferente naturaleza, por ejemplo, observaciones atmosféricas, elevación, así como respuestas de la cubierta de la tierra en varias porciones del espectro electromagnético, registradas con varias resoluciones espaciales y temporales y recolectados por muchos años, por distintos sensores, como es Landsat o Sentinel, estos se distribuyen de forma gratuita y conforman un vasto repositorio (Perilla et al. 2020).

Los estudios fundados en percepción remota se han visto limitados por la ausencia de capacidad para analizar todos los datos disponibles y no solo por la falta de información, lo que ha resultado en investigaciones a escalas locales o regionales o de baja resolución espacial o temporal, lo que lleva a que los análisis para el monitoreo de cambios puedan tardar demasiado, haciendo que los resultados no sean útiles para el apoyo a acciones de fiscalización y una respuesta expedita (Perilla et al. 2020).

Google Earth Engine (GEE, <https://earthengine.google.com>) emergió a finales del 2010 como una forma para eliminar esa limitante computacional y permitir a los usuarios realizar análisis complejos, involucrando grandes cantidades de datos y expandiendo la frontera de la ciencia en percepción remota (Perilla et al. 2020).

GEE está compuesto por cuatro elementos principales. El primero es la infraestructura de Google, la cual pone a disposición del usuario sus servidores, permitiendo así hacer análisis en paralelo con cerca de 10,000 CPUs. Esto agiliza la velocidad de procesamiento en comparación con una computadora individual. El segundo es el acervo de datos (datasets). Google tiene almacenado todas las imágenes de varios sensores (Landsat, Sentinel, MODIS, entre otros). Estas bases de datos se actualizan a medida que se toman nuevas imágenes (cerca de 6,000 nuevas escenas diarias), creando así un enorme catálogo de datos geospaciales. El tercero, es la API, la cual consiste en una serie de comandos y funciones preestablecidas, escritos en lenguaje JAVA, que permite una programación sencilla al desarrollar algoritmos para las investigaciones. Finalmente, el cuarto elemento es el Code Editor, el cual es un entorno de desarrollo integrado en línea, donde se juntan todos los elementos. Aquí es donde el usuario puede, a través de código de trabajo (“scripts”), llamar a los datos, procesar y visualizarlos de manera virtual con los servidores de Google, teniendo así sus resultados e información en la nube. Con ello permite que el usuario cargue a la plataforma sus propios datos en formato ráster o vectorial. De la misma forma, a pesar de que el procesamiento se hace en la nube de GEE, existe una función para poder descargar la información generada al almacenamiento Google Drive del usuario (Perilla et al. 2020).

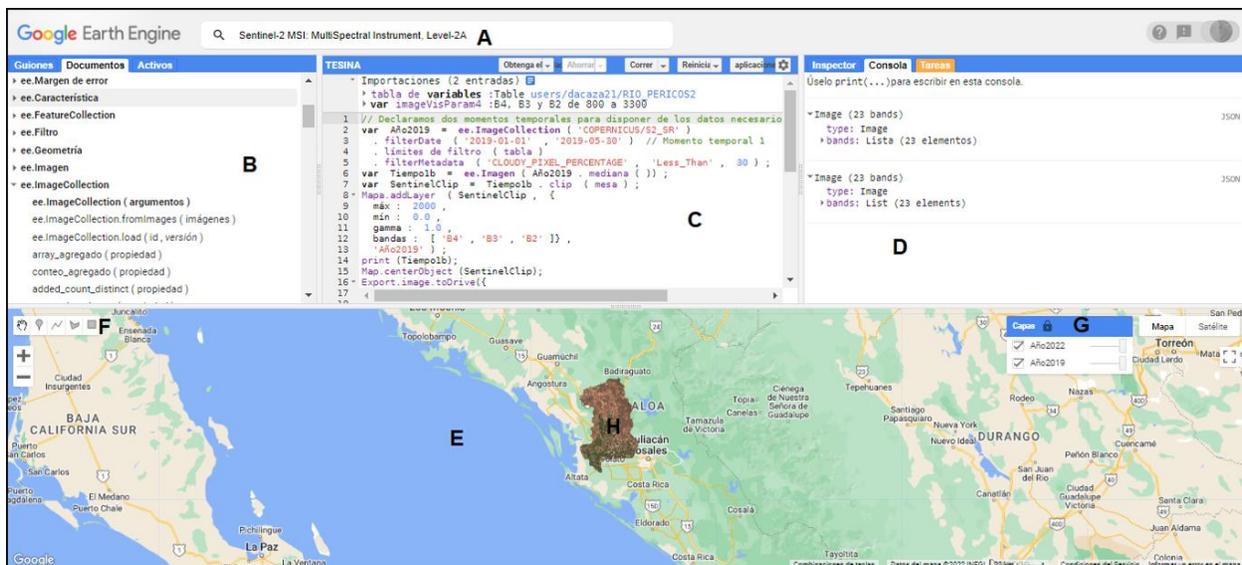


Figura 5. Entorno de trabajo (*code editor*) de GEE y código para obtener imágenes Sentinel-2.

La Figura 5, describe el entorno de trabajo de Google Earth Engine, de la siguiente manera: (a) Buscador, donde se puede buscar los datasets requeridos, en este caso se busca el Sentinel-2. (b) Panel donde se encuentran las funciones preestablecidas del API; se observan funciones de filtros que son usadas en el código. (c) Panel de programación donde el usuario crea sus algoritmos. En este caso, hay un código para buscar imágenes de Sentinel-2A de enero-mayo del 2019 y enero-mayo del 2022 en la subcuenca Río Pericos del Estado de Sinaloa. Para usar dicho código, se usa el ID de “Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2 A” que se obtiene en el buscador. Además, se especifican los parámetros para visualizar las imágenes. (d) Consola donde se muestran solamente los resultados usando la función ‘*print*’ de los análisis que fueron procesados por los servidores de Google. En este caso, se muestra la información contenida en la colección del usuario. Se puede ver que para las fechas y zona establecida hay 23 imágenes disponibles por imagen. (e) Panel de visualización donde se muestran los mapas, ráster o vectores, que el usuario llama en su código. (f) Herramientas de dibujo donde se puede seleccionar una región de interés a través de un punto, una línea o un polígono (filtro geográfico). (g) Capas activas en la visualización, el nombre coincide con el que se indicó en el código, y (h) Imagen del área de estudio, obtenida mediante la ejecución de los comandos, la cual fue descargada y guardada en el drive del correo registrado, para su posterior análisis en el programa de ArcGis.

Gisadminbeers (2019) indica que a diferencia de la plataforma Copernicus y otras plataformas online, la parte buena y rápida de descargar imágenes Sentinel 2 y productos derivados desde el entorno de Google Earth Engine radica en puntos estratégicos como:

- Análisis masivo de datos previos en la nube.
- Descarga masiva de fragmentos indicando todas o parte de las bandas a manejar.
- Ensamblado directo de imágenes para zonas amplias sin necesidad de descargar los tiles individuales de Sentinel 2.
- Composición directa de índices multispectrales y composiciones RGB personalizada.
- Exportación directa sobre Google Drive y bajo resoluciones predefinidas.
- Filtros de imágenes sobre AOI en base a momentos temporales o cobertura de nubes.

3.4 Sistemas de Información Geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIG), son una herramienta científica para el procesamiento de datos geográficos. Estos son sistemas informáticos que sirven para capturar, analizar y mostrar datos geoespaciales, que a su vez describen tanto la ubicación como los atributos de las características espaciales y pueden estar dados en un sistema de coordenadas geográficas o en una proyección, como la UTM (Chang, 2019). Estos SIG son responsables de integrar varios aspectos de los datos geográficos del mundo real y recopilar, operar y analizarlos, además, sirven para múltiples propósitos porque pueden trabajar con todo tipo de datos geográficos del mundo real, incluidos los relacionados con la tierra, como datos topográficos y geológicos, entre otros (Jiménez et al. 2014).

La integración de los SIG con la percepción remota tiene una gran posibilidad de aplicación en la agricultura, desde niveles prediales, regionales, hasta nacionales. A modo de ejemplo, se puede identificar el área exacta de un suelo cubierto por vegetación en una fecha determinada, mapeo de áreas temáticas como la salinidad, cartografía de caminos entre otras diversas aplicaciones para el estudio del ambiente. Estas aplicaciones son de vital importancia al momento de la planificación y gestión del territorio (Chuvieco, 2002).

Un principio básico de los SIG es que, por lo general, los mapas son representados por una serie de capas que contienen diferentes datos geospaciales, los cuales, además, deben de estar alineados espacialmente, es decir, deben de estar en el mismo sistema de coordenadas.

Según la representación de características espaciales, los datos geospaciales se pueden agrupar en datos vectoriales y ráster (Figura 6). El modelo de datos vectoriales utiliza los objetos geométricos de punto, línea y polígono para representar características espaciales con una ubicación espacial y un límite claros. En la que a cada característica se le asigna un ID para que pueda asociarse con sus atributos. El modelo de datos ráster, por otro lado, utiliza una cuadrícula y celdas de cuadrícula para representar características espaciales, de modo que los puntos se representen mediante celdas individuales, las líneas mediante secuencias de celdas vecinas y los polígonos mediante conjuntos de celdas contiguas. El valor de la celda corresponde al atributo de la característica espacial en la ubicación de la celda. Aunque la representación ráster de las características espaciales no es precisa, tiene la ventaja distintiva de tener ubicaciones de celdas fijas. En los algoritmos informáticos, un ráster se puede tratar como una matriz con filas y columnas, y los valores de sus celdas se pueden almacenar en una matriz bidimensional. Debido a su estructura simple, los datos ráster se pueden manipular, agregar y analizar fácilmente. Por el contrario, la manipulación y el análisis de datos vectoriales deben considerar la geometría de sus ubicaciones y límites y, cuando se superponen, se deben calcular las intersecciones de sus límites.

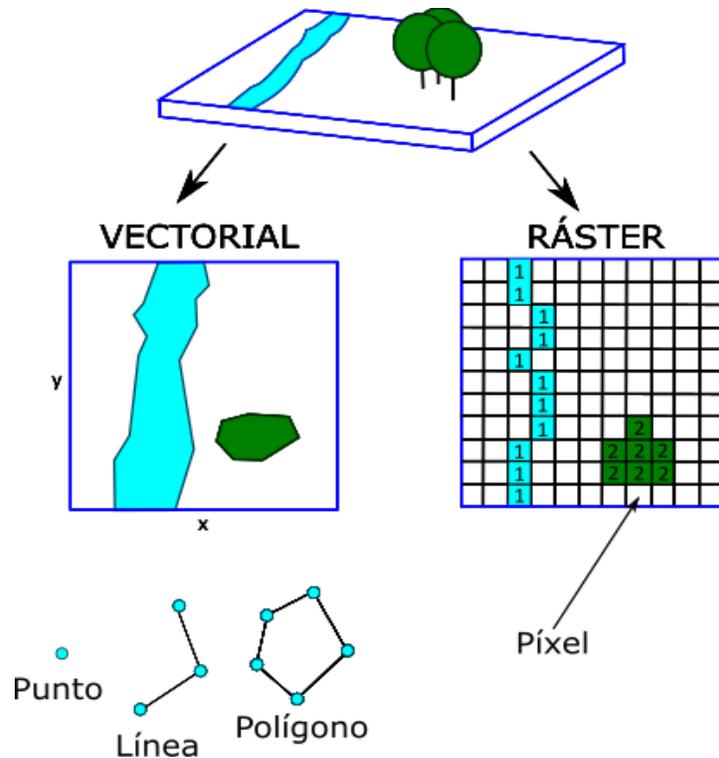


Figura 6. Modelo de datos vectoriales y ráster.

3.5 Clasificación digital

La clasificación digital implica categorizar una imagen multibanda. En términos estadísticos esto supone reducir la escala de medida, de una variable continua (ND), a una escala nominal o categórica (Chuvieco, 1996). Existen dos tipos de clasificación: clasificación supervisada y no supervisada, la primera consiste en tener un cierto conocimiento de la zona y se seleccionan muestras (áreas de entrenamiento), y la segunda no se conoce de la zona y su búsqueda de homogeneidad es automática (Alva y Chávez, 2004). En la clasificación supervisada en la imagen, los píxeles con la identidad conocida, se utilizan para identificar a los que no están identificados.

Galindo et al. (2014) mencionan que, con excepción del esquema no supervisado, las técnicas de clasificación mencionadas requieren un conjunto de áreas de entrenamiento con coordenadas conocidas (especialmente explícitas), las cuales serán luego asociados a los segmentos generados y procurar distribuir el número de áreas de entrenamiento de tal manera que fuera homogéneo entre todas las clases que se iban a utilizar en la clasificación, que a mayor número de áreas de

entrenamiento mejores serían los resultados de la clasificación, disminuyendo significativamente la incertidumbre de los resultados. Meidinger (2003) señala que los puntos de verificación se deben de distribuir aleatoriamente (distribución uniforme tanto en X como en Y). Para evitar la autocorrelación espacial se establece que los puntos seleccionados deben estar separados entre sí por lo menos 5,000 m.

La clasificación de imagen se refiere al proceso de agrupación de los píxeles utilizando algoritmos que toman la reflectancia de cada píxel para cada longitud de onda con un análisis estadístico de modo que es asignado a una clase espectral (Sánchez, 2002).

Galindo et al. (2014) menciona que la principal ventaja de este código es que hace posible generar un mosaico píxel a píxel, es decir, selecciona el mejor píxel de diferentes escenas para un área de interés (AOI) o estudio. Para esto se define un intervalo de fechas de la serie temporal de imágenes satelitales disponibles en el AOI, tanto para el tiempo 1, como para el tiempo 2. Posteriormente, el algoritmo selecciona el píxel mejor de todas las escenas disponibles (píxel mejor se refiere a uno sin nubes o sombras de nubes, y que tenga el valor más alto del índice disponible, de manera que siempre se puedan comparar los píxeles con la mayor vigorosidad de la vegetación entre las diferentes temporalidades). La generación de un mosaico píxel a píxel da la ventaja de que se puede contar con más información del AOI, porque si una escena presenta un área con nubes, esta puede ser reemplazada con los píxeles de otra fecha, por tanto, hay una menor pérdida de información (Albornoz et al. 2021; Tristan et al. 2008) indican en sus estudios, que cada sensor tiene características y dispositivos diferentes que definen la resoluciones (espacial, espectral, radiométrica y temporal) en todas sus dimensiones. Es decir, que las imágenes resultantes también tienen resoluciones diferentes de las otras, de tal manera que deben de realizar operaciones previas al análisis, para llegar a normalizar todas las imágenes de la secuencia de manera que éstas puedan ser comparables entre sí.

Lu et al. (2004) sugieren tres criterios de clasificación de los métodos existentes para la detección de cambios de uso del suelo en terrenos forestales. El primero se fundamenta en la técnica empleada para detectar el cambio de cobertura, que puede estar enlazado a un cambio en la reflectividad o en las texturas de la imagen, las cuales son separables y afectadas por las limitaciones espaciales, espectrales, temáticas y temporales. El segundo criterio se basa en la temporalidad de la información que incluye: (a) análisis bitemporal (imágenes de dos fechas); (b)

análisis multitemporal (varias fechas o series de tiempo); y (c) predicción de cambios a futuro. Finalmente, el tercer criterio de clasificación se fundamenta en el tipo de datos empleados (Chuvienco, 2000), los cuales pueden agruparse: Análisis de datos continuos que incluyen todas las metodologías numéricas tales como: Álgebra de mapas, transformaciones matemáticas y modelación. Mientras que los datos categóricos se basan en una post-clasificación con matrices de cambio o cadenas de Markov.

3.6 Localización del área de estudio

El área de estudio se ubica en la subcuenca hidrográfica Río Pericos, tiene la clave RH10Dd, y pertenece a la cuenca hidrográfica Río Mocorito y la región hidrológica 10, que lleva el nombre de Sinaloa. Esta subcuenca abarca una superficie total de 196,748.44 ha, y políticamente se encuentra en los municipios de Mocorito, Badiraguato, Navolato, Salvador Alvarado, Angostura y Culiacán (Figura 7); donde la porción que contiene cada municipio se muestra en el Cuadro 2. Se localiza entre las coordenadas Norte 224078, Este 2803172 y Norte 221707, Este 2735935 con proyección cartográfica UTM.

Cuadro 2. Superficie de los municipios dentro de la subcuenca Río Pericos.

Municipio	Superficie (ha)
Culiacán	36,522.13
Navolato	40,783.39
Salvador Alvarado	1,350.57
Mocorito	95,894.99
Badiraguato	22,197.36
Total	196,748.44

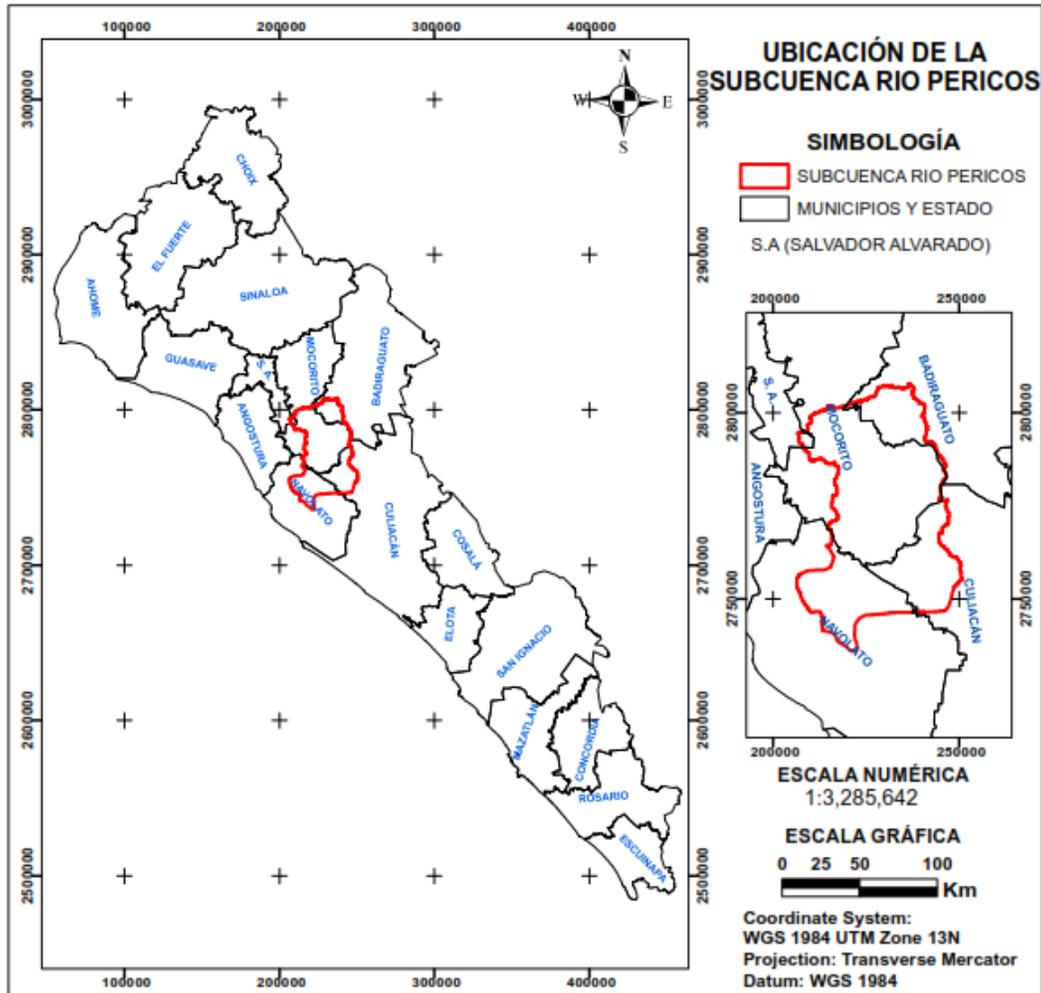


Figura 7. Localización del área de estudio en el estado de Sinaloa y municipios.
Elaboración propia con datos de (CONABIO, 2022).

3.6.1 Caracterización de la subcuenca Río Pericos

A continuación se presenta una descripción de las características generales de la subcuenca del Río Pericos: relieve, usos de suelo y tipo de vegetación, hidrología y clima.

Relieve

Según el portal de INEGI (2022), la conformación del relieve que abarca la superficie estatal de Sinaloa está dividido en 7 grandes zonas (Figura 8), en el noreste se encuentra la gran meseta y cañones duranguenses, del norte hasta el sur de la entidad se encuentra la provincia pie de la sierra, en el sureste se encuentra la meseta y cañadas del sur, donde también se han desarrollado lomeríos. Por otra parte, en el oeste se encuentra la llanura costera y deltas de Sonora y Sinaloa y

al suroeste la provincia Costera Mazatlán que se extienden mayormente hasta la zona costera. Para el área de estudio, según el portal de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 1997), se presentan principalmente 6 diferentes tipos de relieve (Figura 9), donde se encuentra predominantemente la llanura costera con 98,912.54 ha (50.27 %), seguido de sierra baja con lomeríos con 67,920.88 ha (34.52 %). Otros tipos de relieve que caracterizan la zona de estudio son llanura costera con lomerío rocoso con 12,337.61 ha (6.27 %), sierra baja con 8,444.32 ha (4.29 %), Ciénega salina con 3,363.78 ha (1.70 %) y sierra alta con 5,769.29 ha (2.93 %).

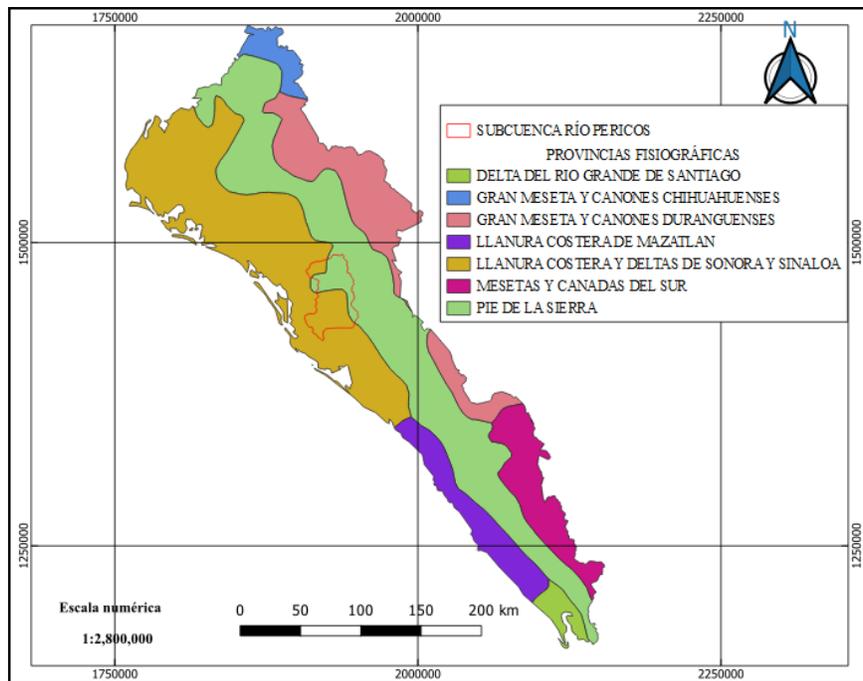


Figura 8. Características generales de relieve del Estado de Sinaloa (INEGI, 2022b).

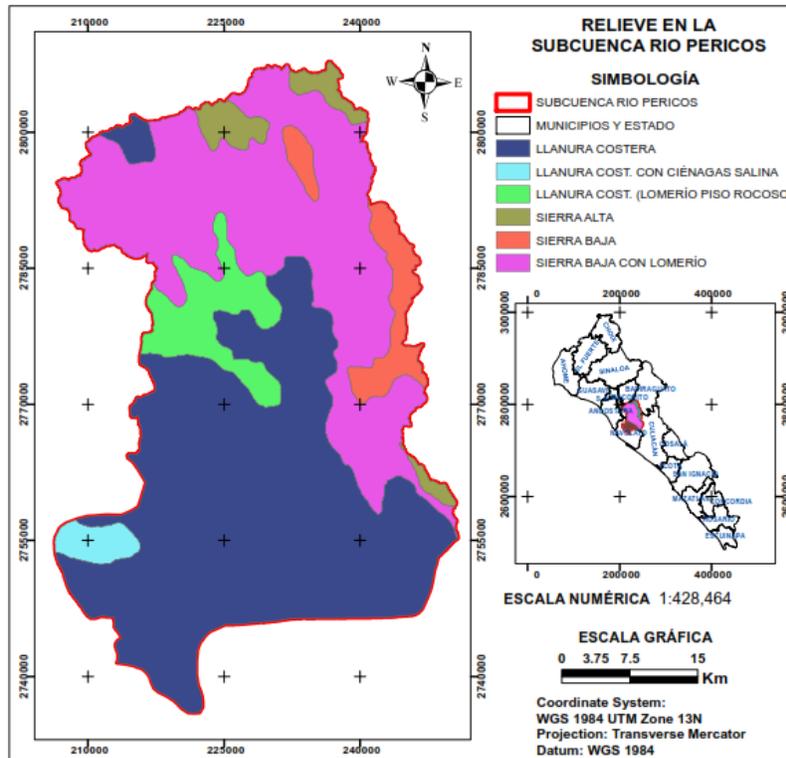


Figura 9. Características de relieve de la subcuenca Río Pericos. Elaboración propia con datos de (CONABIO, 2022).

Usos de suelo y tipos de vegetación

En la región que presenta clima cálido subhúmedo se cultiva jitomate, sandía, melón y hortalizas, principalmente, donde las principales actividades agrícolas de Sinaloa se dan gracias a los 11 ríos que se encuentran dentro de esta entidad, así como 12 presas que se encuentran en los causes de estos (Balvanera, et al. 2008).

Sinaloa es muy importante como productor agrícola nacional, las principales áreas de cultivo se encuentran en los climas secos y semisecos, por lo que requiere principalmente el riego anual, siendo los principales cultivos: maíz, frijol, papa, cártamo, soya, algodón, sorgo, garbanzo, entre otros, donde el 42.71 % (84,029.63 ha) de la superficie de la subcuenca se utiliza para agricultura de riego anual. La agricultura de temporal es la segunda actividad en esta área, la cual presenta un porcentaje del 27.55 % (44,343.55 ha). Cabe destacar que solo el 27.55 % (54,210.03 ha) de la superficie de la subcuenca está ocupada por vegetación que aún no ha sido afectada por la

deforestación, solo el 0.43 % está ocupada por agua. Los principales usos de suelo y vegetación de muestran en el Cuadro 3 y la Figura 10.

Cuadro 3. Uso de suelo y vegetación de la subcuenca Río Pericos (CONABIO, 2022).

Clave	Uso de suelo y vegetación	Superficie (ha)	Porcentaje
RA	Agricultura de riego anual	84,029.63	42.71
RAS	Agricultura de riego anual y semipermanente	10,238.57	5.20
RP	Agricultura de riego permanente	668.04	0.34
RS	Agricultura de riego semipermanente	260.43	0.13
TA	Agricultura de temporal anual	44,343.55	22.54
H2O	Agua	848.57	0.43
BQ	Bosque de encino	126.32	0.06
PC	Pastizal cultivado	317.80	0.16
SBC	Selva baja caducifolia	29,641.15	15.07
SBK	Selva baja espinosa caducifolia	4,801.24	2.44
VT	Tular	616.40	0.31
AH	Urbano construido	1,831.80	0.93
VHH	Vegetación halófila hidrófila	2139.00	1.09
VSA/SBC	Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	6,633.15	3.37
VSa/SBC	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	9,461.88	4.81
Vsa/SBK	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa caducifolia	790.89	0.40
Total		196,748.44	100.00

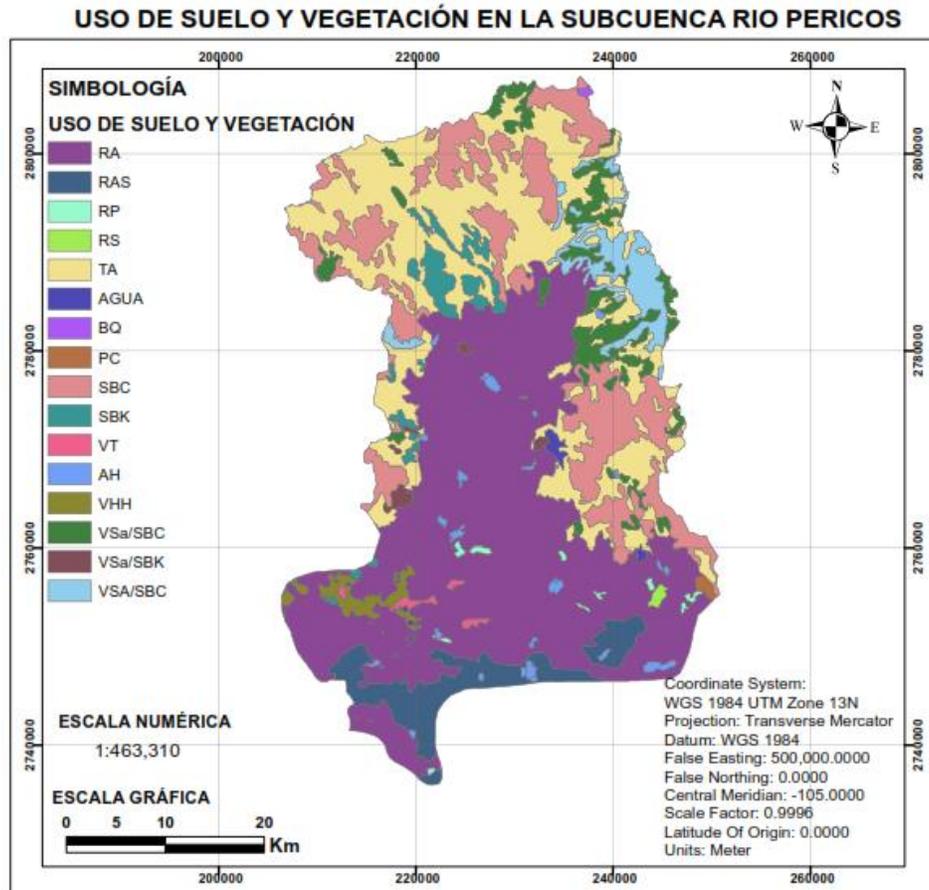


Figura 10. Uso de suelo y vegetación de la subcuenca Río Pericos. Elaboración propia con datos de CONABIO (2022).

Hidrología

En la Figura 11 se muestra el escurrimiento natural medio superficial total en millones de m^3 (hm^3) por región hidrológica administrativa de la República Mexicana en el 2006. Se observa que para la subcuenca Río Pericos el intervalo de escurrimiento medio anual es de 6,859 a 22,486 hm^3 , con lluvias principalmente en verano (durante los meses de julio a septiembre) que presentan una precipitación media del estado de 790 mm anuales (Balvanera, et al. 2008). En la Figura (12) se muestra la red hidrológica de la subcuenca del Río pericos (INEGI, 2022c). Adicionalmente, existen canales principales de riego, entre ellos el Canal Humaya, que proviene de la Presa Andrew Weiss, ubicada en Culiacán, que a la vez se deriva de la presa Adolfo López Mateos perteneciente al municipio de Badiraguato, recorre gran parte de la subcuenca, y

atraviesa esta área en sentido sureste-noroeste, y proporciona agua para la agricultura a gran parte de la subcuenca, es importante destacar su importancia para la economía del estado.

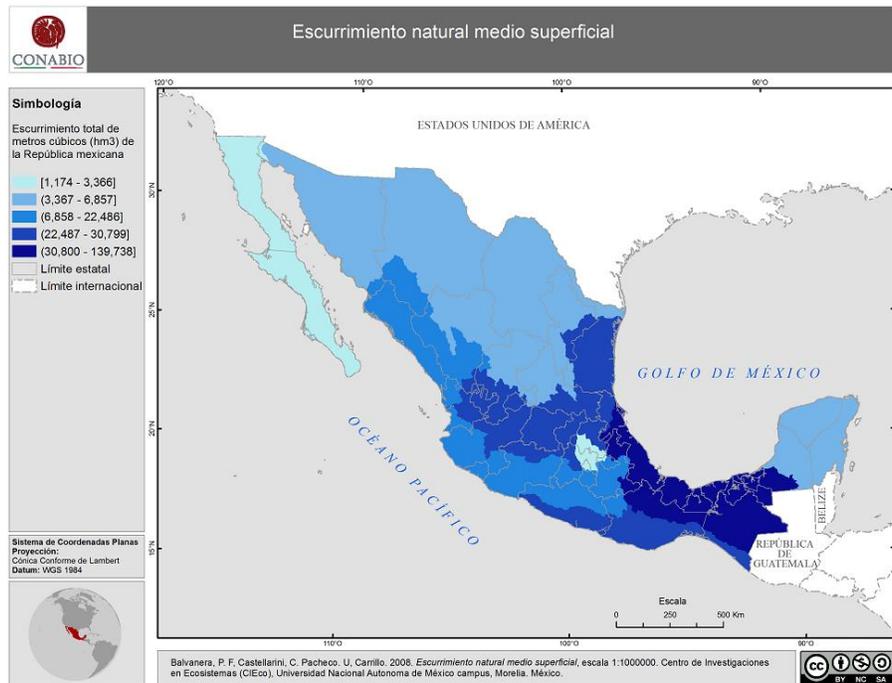


Figura 11. Escurrecimiento natural medio superficial (CONABIO, 2022).

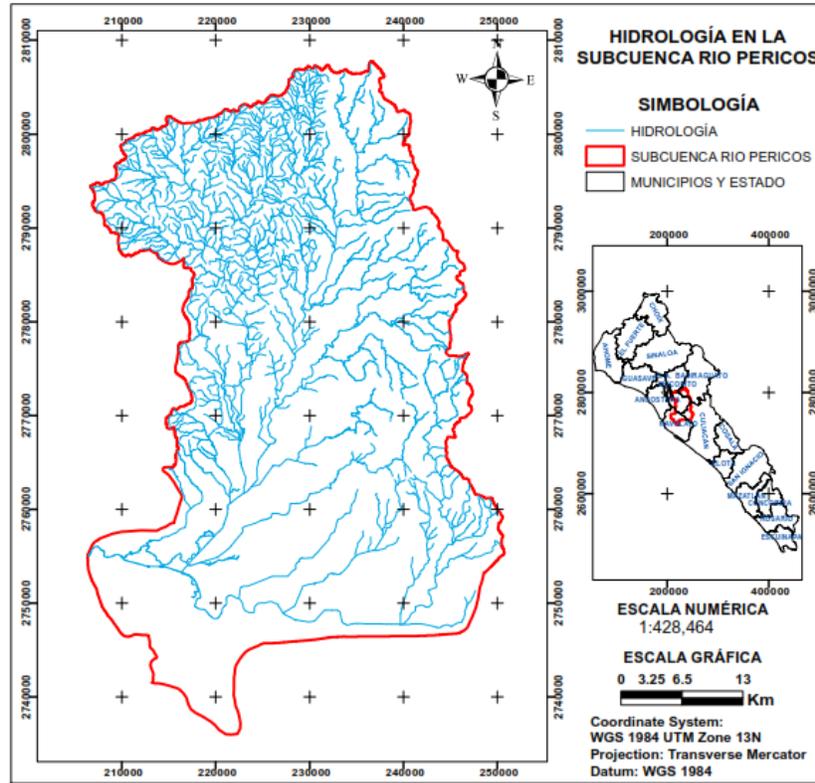


Figura 12. Red hidrológica de la subcuenca Río Pericos. Elaboración propia con datos de INEGI (2022c)

Clima

La Figura 13 representa los diferentes tipos de climas de la subcuenca Río Pericos de acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1998), escala 1:1,000,000 (CONABIO, 2022).

Según INEGI (2022), el 48 % del estado de Sinaloa presenta clima cálido subhúmedo localizado en una franja noreste-sureste que abarca desde Choix hasta los límites con Nayarit. El 40 % es clima seco y semiseco y están presentes en una franja que va desde El Fuerte hasta Mazatlán, el 10 % es muy seco y se localiza en la zona de Los Mochis, mientras que el restante 2 % es clima templado subhúmedo localizado en las partes altas de la Sierra Madre Occidental.

Los climas predominantes dentro de la subcuenca son: BS1 (h') w se caracteriza por ser semiárido cálido, con temperatura media anual mayor a 22°C, y temperatura del mes más frío mayor que 18°C. El porcentaje de lluvias en verano e invierno son del 5 al 10.2 % del total anual, y la superficie que abarca este clima es de aproximadamente 125,556.07 ha.

BSo (h' w), se caracteriza por ser árido cálido, con temperatura media anual mayor a 22°C, y temperatura del mes más frío mayor que 18°C, presentándose esta misma temperatura para todos los climas que predominan en la subcuenca. El porcentaje de lluvias en verano e invierno son del 5 al 10.2 % del total anual, al igual que el clima BS1 (h' w), y la superficie que abarca este es de aproximadamente 48,448.01 ha.

Awo, se caracteriza por ser cálido subhúmedo, con temperaturas igual a los climas antes mencionados. Presenta una precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm, lluvias de verano con índice P/T menor que 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2 % del total anual. La superficie aproximada de este clima en la subcuenca es de aproximadamente 22,744.36 ha.

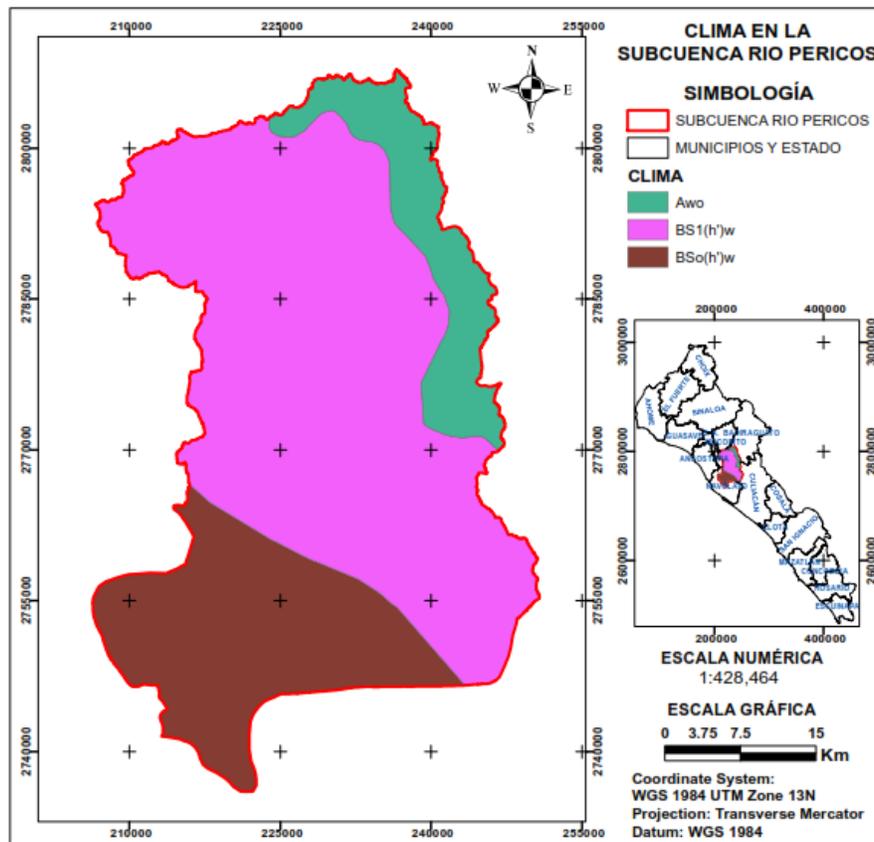


Figura 13. Climas en el área de estudio. Elaboración propia con dato de CONABIO (2022).

3.7 Definiciones de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable y su reglamento

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS), reformada y publicada el 26 de abril del 2021, en su artículo 1, indica que es “*observancia general en todo el territorio nacional, y tiene por objeto regular y fomentar el manejo integral y sustentable de los territorios forestales, la conservación, protección, restauración, producción, ordenación, el cultivo, manejo y aprovechamiento de los ecosistemas forestales del país y sus recursos*” motivo por el cual es necesario tener claro las definiciones incluidas en su artículo 7 y tener un criterio claro, para obtener resultados acordes a la normatividad ambiental mexicana y resultados eficientes, que para los efectos de LGDFS, su reglamento y de este estudio, se entenderá por:

V Bis. Bosque: Ecosistema forestal principalmente ubicado en zonas de clima templado en el que predominan especies leñosas perennes que se desarrollan de forma espontánea y que cuentan con las características para ser considerados terrenos forestales arbolados de acuerdo con esta Ley; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

VI. Cambio de uso del suelo en terreno forestal: Remoción total o parcial de la vegetación forestal de los terrenos forestales arbolados o de otros terrenos forestales para destinarlos o inducirlos a actividades no forestales (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

XVI. Cuenca Hidrográfica: Superficie geográfica delimitada por la parte más alta de las montañas a partir de la cual fluyen las corrientes de agua, las cuales se unen y desembocan a una presa, lago o al mar; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

XVIII. Deforestación de terrenos forestales arbolados: La conversión de terrenos forestales arbolados a otro tipo de uso del suelo, por causas inducidas o naturales, o bien, la reducción permanente de la cobertura de copa por debajo del umbral del diez por ciento; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

XIX. Degradación forestal: Proceso de disminución de la capacidad de los terrenos forestales en uno o varios de sus componentes para brindar servicios ambientales, así como la pérdida o reducción de su capacidad productiva; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

XIX Bis. Degradación de terrenos forestales arbolados: Reducción de la biomasa arriba del suelo en terrenos forestales arbolados sin que cause una reducción de la cobertura de copa por debajo del umbral mínimo del diez por ciento; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

XXII Bis. Pérdida de vegetación forestal: La conversión de terrenos forestales por causas inducidas o naturales a otro tipo de uso del suelo, o la reducción de la cobertura de vegetación forestal; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

XXIII. Ecosistema Forestal: La unidad funcional básica de interacción de los recursos forestales entre sí y de éstos con el ambiente, en un espacio y tiempo determinados; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

XXXVIII Bis. Otros terrenos forestales: Terrenos cubiertos de vegetación forestal que no reúnen las características para ser considerados terrenos forestales arbolados; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

LX Bis. Selva: Ecosistema forestal de clima tropical en el que predominan especies leñosas perennes que se desarrollan en forma espontánea, excluyendo los acahuales y guamiles y que cuentan con las características para ser considerados terrenos forestales arbolados de acuerdo con esta Ley. En esta categoría se incluyen a todos los tipos de selva, manglar y palmar, de la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

LXX. Terreno diverso al forestal: Es el que no reúne las características y atributos biológicos definidos para los terrenos forestales; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

LXXI. Terreno forestal: Es el que está cubierto por vegetación forestal o vegetación secundaria nativa, y produce bienes y servicios forestales; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

LXXI Bis. Terreno forestal arbolado: Terreno forestal que se extiende por más de 1,500 m² dotado de árboles de una altura superior a 5 m y una cobertura de copa superior al diez por ciento, o de árboles capaces de alcanzar esta altura in situ. Incluye todos los tipos de bosques y

selvas de la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía que cumplan estas características; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

LXXX. Vegetación forestal: Es el conjunto de plantas y hongos que crecen y se desarrollan en forma natural, formando bosques, selvas, zonas áridas y semiáridas, y otros ecosistemas, dando lugar al desarrollo y convivencia equilibrada de otros recursos y procesos naturales; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

LXXXI. Vegetación secundaria nativa: Aquella vegetación forestal que surge de manera espontánea como proceso de sucesión o recuperación en zonas donde ha habido algún impacto natural o antropogénico; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

Se incluye la fracción I del artículo 2 del reglamento de la LGDFS, que se entenderá por:

I. Acahual, asociaciones vegetales que se localizan en áreas originalmente ocupadas por selvas que han sido sometidas al establecimiento de praderas artificiales y cultivos anuales o perennes mediante un sistema de producción tradicional, en subsecuentes años de cultivo que al estar en periodos de descanso recuperan la vegetación de selva a través de un proceso de sucesión ecológica y que presentan diferencias de estructura, composición, tamaño o densidad con respecto a las selvas maduras; (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2020).

XXV. Vegetación forestal de zonas áridas y semiáridas, aquella que se desarrolla en forma espontánea en regiones de clima árido o semiárido, formando masas mayores a 1,500 m². Se incluyen todos los tipos de matorral, selva baja espinosa y chaparral de la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, así como cualquier otro tipo de vegetación espontánea arbórea o arbustiva que ocurra en zonas con precipitación media anual inferior a 500 mm.(Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2020).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso requerido para determinar la deforestación en la subcuenca Río Pericos se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 15.

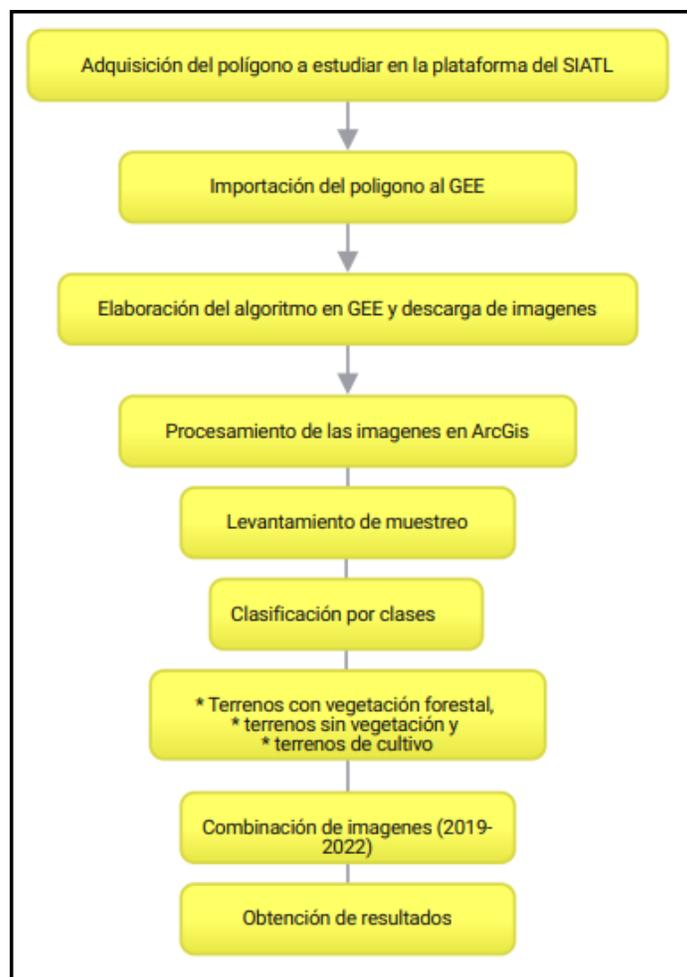


Figura 14. Diagrama de flujo para determinar la deforestación en la subcuenca Río Pericos.

4.1 Delimitación del área de estudio

Se seleccionó a la subcuenca hidrográfica Río Pericos considerando que reúne una serie de características que favorecen el cambio de uso de suelo: existe una franja agrícola adyacente a la vegetación forestal la cual ha sufrido deforestación, el área de análisis en su mayoría son llanuras y sierra baja (97.07 % de su superficie), aptas para la agricultura, lo que aumenta el interés para los agricultores; existe una gran cantidad de caminos y carreteras que hacen más fácil el acceso a cualquier lugar de la subcuenca para los agricultores. Adicionalmente, las condiciones de accesibilidad fueron de ayuda para el levantamiento del muestreo y fotografías para este estudio.

La poligonal de la subcuenca Río Pericos se obtuvo de la plataforma conocida como Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) creada por INEGI, la cual permite la descarga de las poligonales en formato shape de las cuencas y subcuencas hidrográficas de la República Mexicana.

4.1.1 Material satelital

Se utilizó la plataforma geomática de Google Earth Engine, que contiene información geoespacial del planeta en la nube y permite a los usuarios visualizar, analizar y descargar imágenes de los principales satélites de forma gratuita. Se registraron los datos generales, se importó la poligonal y se escribió el algoritmo con el código para solicitar a GEE para proyectar las imágenes deseadas. Para este caso se descargaron las imágenes del satélite “Sentinel-2 MSI: instrumento multiespectral, nivel 2A”, con la indicación de que proyectara dos colecciones de imágenes, siendo para el tiempo 1 denominada “Año2019” el intervalo de fecha del 1 de enero al 30 de mayo de 2019 y para el tiempo 2 denominada “Año2022” el intervalo de fecha del 1 de enero al 30 de mayo de 2022 (Figura 15). Para “Año2019” se consiguieron 89 imágenes satelitales (Anexo 3) y para el “Año2022” 104 imágenes satelitales limpias (Anexo 4) y sin distractores atmosféricos, con una periodicidad de 5 días.

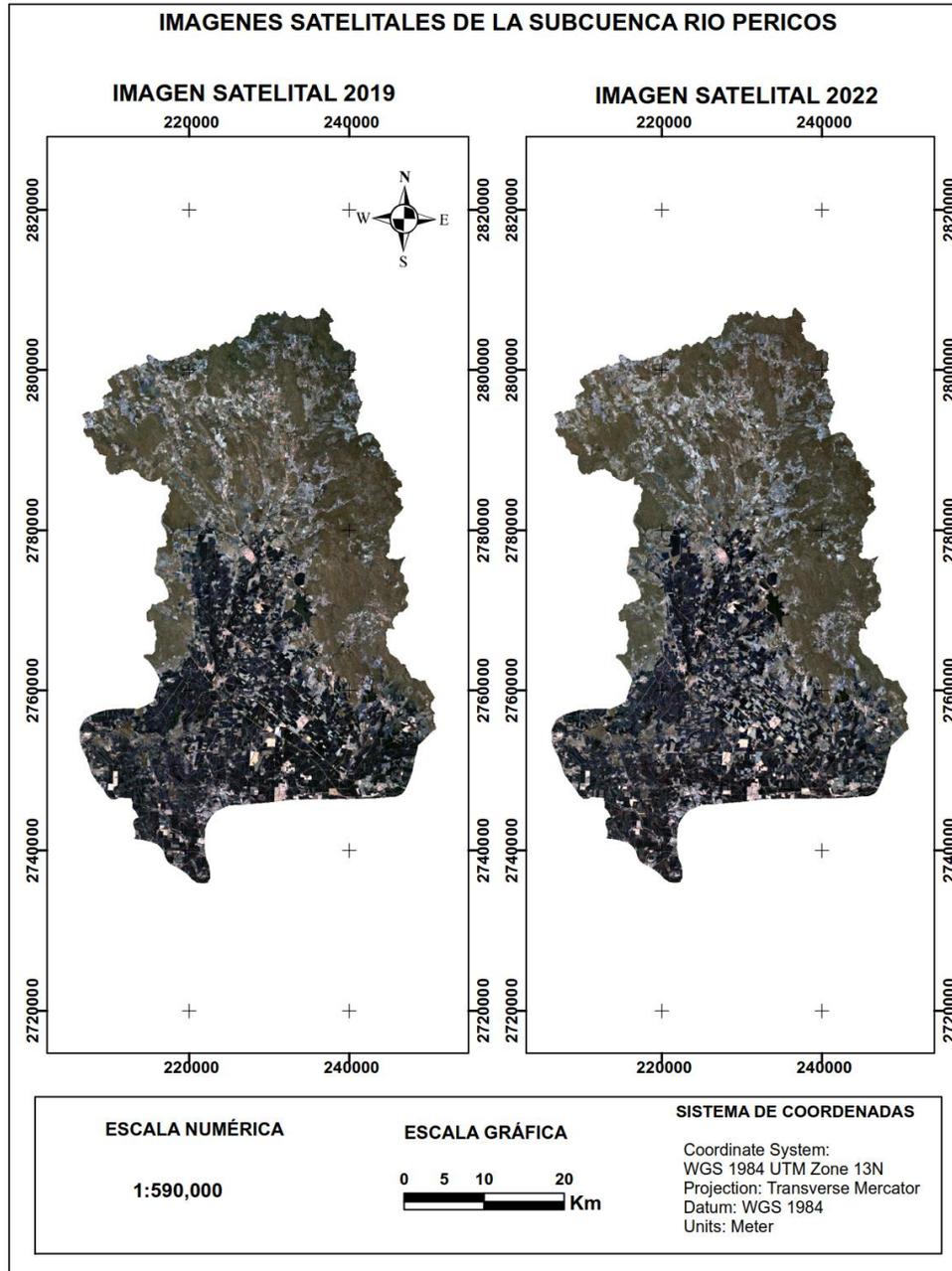


Figura 15. Imágenes satélites de Sentinel del año 2019 y 2022 de la subcuenca Río Pericos.

4.2 Código de programación en la plataforma Google Earth Engine

Se editó y aplicó un código en lenguaje de programación JavaScript para Google Earth Engine (GEE), el cual permitió descargar las dos colecciones de imágenes satelitales para realizar el proceso en ArcGis 10.5. A continuación se definen cada una de estas resoluciones, el

procedimiento y los códigos de programación utilizados dentro de las funciones del GEE, lo que facilitó la normalización de las imágenes satelitales.

Primeramente, se aplicó la función “**.filterBounds**” que delimita el área de interés (AOI) para el procesamiento de los diferentes códigos de programación en GEE. El AOI se encuentra definido por el polígono de la subcuenca hidrográfica Río Pericos, el cual fue insertado en la interfaz de GEE con la función “table”.

La resolución espacial es la capacidad del satélite para diferenciar el objeto más chico posible en una imagen satelital. Actualmente existen sensores con resoluciones por debajo de un metro mientras que hay otros que oscilan alrededor de los 11,000 m. Para este estudio se descargaron imágenes del satélite sentinel-2, nivel A, MSI: instrumento multiespectral, el cual proporcionó imágenes que cuentan con una resolución espacial de 10x10 m. Estas fueron adquiridas de la plataforma de Google Earth Engine, mediante el código: `var Año2019 = ee.ImageCollection ('COPERNICUS/S2_SR')` y `var Año2022 = ee.ImageCollection ('COPERNICUS/S2_SR')`. La resolución se aplicó para todas las imágenes descargadas, con el mismo satélite y bandas ayudando a que estén normalizadas.

Resolución radiométrica es la capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiancia espectral, esta es registrada matricialmente por un arreglo de celdas, cada una de las cuales reporta un nivel digital (ND) proporcional a la cantidad de energía electromagnética recibida, con valores entre 0 y 1, que tiene una resolución radiométrica de 12 bits. Los píxeles imperfectos, sin datos y saturados, se excluyen de los pasos de procesamiento del Nivel-2A. Los algoritmos empleados en el proceso de generación del Nivel-2A requieren información derivada de bandas con diferentes resoluciones. Las imágenes se encuentran corregidas atendiendo a los parámetros relativos a la atmósfera (visibilidad, vapor de agua, presencia de nubes o cirros y contenido de aerosoles y ozono), a la geometría de la iluminación-observación (ángulo cenital solar, ángulo azimutal solar y topografía del terreno), con escenas ortorrectificadas y con reflectancia calibrada al tope de la atmósfera (TOA).

En apoyo a las imágenes ortorrectificadas y con reflectancia calibrada, se insertó un código para definir el porcentaje de nubes, se consideró la función “**.filterMetadata**” mediante el criterio

('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'Less_Than', 30), para la obtención de imágenes con menos del 30 % de nubosidad.

Resolución temporal es la capacidad del sistema para discriminar los cambios temporales sufridos por la superficie en estudio. Este concepto hace referencia a la periodicidad con que el sensor puede adquirir una nueva imagen del mismo punto de la superficie terrestre (Tristan et al. 2008).

La constelación Sentinel 2 que fue seleccionada para el estudio, está formada por dos satélites que orbitan con un desfase de 180° entre sí para situarlos en extremos opuestos del globo terrestre y disponer de imágenes con una recurrencia temporal mayor. La adquisición de imágenes, o resolución temporal, es de 10 días por satélite o 5 días en conjunto. Por tanto, se dispondrá de una nueva imagen satélite actualizada para la misma zona de trabajo en periodos temporales no superiores a los cinco días. Si la zona de trabajo no está nublada, se podrá consultar entre una y dos imágenes por semana (Gisadminbeers, 2019b).

Con referencia a la temporalidad elegida, se definió el intervalo de fechas y se aplicó la función **“filterDate”** para definir el alcance temporal de la selección de imágenes, para esto, fue necesario definir una fecha inicial para el tiempo 1 (Año2019), la cual fue delimitado del 1 de enero del 2019 al 30 de mayo del 2019 y una fecha final para tiempo 2 (Año2022) que comprende las fechas del 1 de enero del 2022 al 30 de mayo del 2022, tomando en consideración que es la época menos lluviosa, por lo tanto, con menos nubosidad, considerando que en esta temporalidad las selvas bajas caducifolias se encuentran secas, diferenciándose muy bien de terrenos cultivados, los cuales tienen colores vivos. La Figura 16 muestra la información de la estación meteorológica con clave 00025071 que lleva el nombre de Pericos.

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL													
NORMALES CLIMATOLÓGICAS													
ESTADO DE: SINALOA												PERIODO: 1981-2010	
ESTACION: 00025071 PERICOS	LATITUD: 25°05'35" N.						LONGITUD: 107°41'40" W.			ALTURA: 51.0 MSNM.			
ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA MAXIMA													
NORMAL	28.4	29.6	31.6	34.2	36.5	37.6	36.7	35.9	35.4	35.4	32.4	28.8	33.5
MAXIMA MENSUAL	33.3	33.8	36.4	36.2	38.2	39.4	39.3	37.6	37.8	37.8	34.9	32.0	
AÑO DE MAXIMA	1993	1996	1993	1982	1992	1993	1994	1993	1994	1994	1999	1993	
MAXIMA DIARIA	39.0	36.0	39.0	40.0	41.0	42.0	42.5	41.5	43.0	40.0	39.5	37.0	
FECHA MAXIMA DIARIA	06/2006	17/1994	26/1993	05/2002	30/2007	13/2009	13/1999	27/1981	21/1982	05/1985	24/2005	08/1981	
AÑOS CON DATOS	27	28	28	25	21	25	28	29	28	28	26	25	
TEMPERATURA MEDIA													
NORMAL	19.2	20.0	21.5	23.9	26.6	30.2	30.4	29.8	29.4	27.8	23.4	19.7	25.2
AÑOS CON DATOS	27	28	28	25	21	25	28	29	28	28	26	25	
TEMPERATURA MINIMA													
NORMAL	10.0	10.4	11.3	13.6	16.8	22.8	24.1	23.7	23.4	20.2	14.4	10.6	16.8
MINIMA MENSUAL	7.0	7.2	7.7	10.9	14.8	21.3	22.8	22.2	21.8	16.8	11.1	8.1	
AÑO DE MINIMA	2008	2008	2008	2008	1995	1995	1984	2000	2007	2007	1995	1999	
MINIMA DIARIA	1.5	3.0	1.3	8.0	10.0	11.0	15.0	15.0	16.0	10.5	6.5	1.2	
FECHA MINIMA DIARIA	19/2008	21/1984	05/1984	08/1983	09/1995	08/1983	22/1984	18/1995	28/1989	24/2007	30/2002	29/2006	
AÑOS CON DATOS	27	28	28	25	21	25	28	29	28	28	26	25	
PRECIPITACION													
NORMAL	23.1	10.4	2.9	6.4	0.0	22.5	162.8	211.2	164.5	66.6	24.6	28.3	723.3
MAXIMA MENSUAL	210.0	81.5	22.0	121.0	0.0	102.0	385.6	429.0	369.3	458.3	113.4	170.0	
AÑO DE MAXIMA	1992	2005	1983	1997	1981	1984	1984	1989	1982	1981	1982	1987	
MAXIMA DIARIA	69.0	39.0	15.0	60.0	0.0	58.0	131.0	112.0	225.0	323.0	64.5	90.0	
FECHA MAXIMA DIARIA	29/1984	04/1983	03/1981	03/1997	01/1981	27/2000	25/1985	07/1984	02/1998	07/1981	25/1982	18/1987	
AÑOS CON DATOS	27	28	28	25	21	25	28	29	28	28	26	25	
EVAPORACION TOTAL													
NORMAL	103.7	121.5	181.4	225.6	280.1	261.4	208.3	179.9	155.0	154.9	117.5	92.8	2,082.1
AÑOS CON DATOS	26	27	27	25	20	23	26	27	25	26	25	24	
NUMERO DE DIAS CON LLUVIA													
NORMAL	1.9	1.2	0.5	0.4	0.0	2.1	11.5	12.9	8.4	2.5	1.6	1.6	44.6
AÑOS CON DATOS	27	28	28	25	21	25	28	29	28	28	26	25	
NIEBLA													
NORMAL	0.2	0.1	0.1	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9
AÑOS CON DATOS	27	28	28	25	21	25	28	29	28	28	26	25	
GRANIZO													
NORMAL	0.1	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
AÑOS CON DATOS	27	28	28	25	21	25	28	29	28	28	26	25	
TORRENTA E.													
NORMAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
AÑOS CON DATOS	27	28	28	25	21	25	28	29	28	28	26	25	

Figura 16. Datos de las normales climatológicas de la estación meteorológica 00025075 en la subcuenca Río Pericos (SMN, 2020).

Resolución espectral es la capacidad del sensor para discriminar la radiancia detectada en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético. La resolución espectral está determinada por el número de bandas que el sensor puede captar y por la anchura espectral de éstas.

El satélite lleva un sensor multiespectral que registra una franja de 290 km. El sensor proporciona un conjunto versátil de 13 bandas espectrales que van desde el visible y el infrarrojo cercano hasta el infrarrojo de onda corta, con cuatro bandas espectrales a 10 m, seis bandas a 20 m y tres bandas a 60 m de resolución espacial (Figura 2).

Las bandas usadas para el estudio fueron la B2 (Azul), B3 (Verde) y B4 (Azul) con una resolución de 10 m.

Código de programación para obtener la imagen satelital del 1 de enero de 2019 al 30 de mayo de 2019 y de 1 de enero de 2022 al 30 de mayo de 2022.

//Momento temporal (Año 2019)

```
var Año2019 = ee.ImageCollection ('COPERNICUS/S2_SR')
  .filterDate ('2019-01-01','2019-05-30')
  .filterBounds (table)
  .filterMetadata ('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'Less_Than', 30);
```

//Obtener el número de imágenes

```
var contar = Año2019.size ();
print ('Tamaño de colección Año2019', contar);
print (Año2019);
var Tiempo1 = ee.Image(Año2019.median());
var SentinelClip = Tiempo1.clip (table);
Map.addLayer (SentinelClip, {max: 2000, min: 0.0, gamma: 1.0, bands: ['B4','B3','B2']},
'Año2019');
print (Tiempo1);
Map.centerObject (SentinelClip);
Export.image.toDrive ({image: SentinelClip.select ("B1", "B2", "B3", "B4"), description:
'Año2019', scale: 10, region: table});
```

//Momento temporal (Año 2022)var Año2022 = ee.ImageCollection ("COPERNICUS/S2_SR")

```
.filterDate ('2022-01-01','2022-05-30')
.filterBounds (table)
.filterMetadata ('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'Less_Than', 30);
```

//Obtener el número de imágenes

```
var contar = Año2022.size ();
print ('Tamaño de colección Año2022', contar);
```

```
print (Año2022);  
var Tiempo2 = ee.Image (Año2022.median ());  
var SentinelClip = Tiempo2.clip (table);  
Map.addLayer (SentinelClip, {max: 3300, min: 800, gamma: 1.0, bands: ['B4','B3','B2']},  
'Año2022');  
print (Tiempo2);  
Map.centerObject (SentinelClip);  
Export.image.toDrive ({image: SentinelClip.select ("B1", "B2", "B3", "B4"), description:  
'Año2022', scale: 10, region: table});
```

4.3 Método de clasificación de terrenos en ArcGis

En este análisis se usó la clasificación supervisada implementada en el Software ArcGIS, que según Caicedo (2021), constituye contar con zonas de entrenamiento donde se tiene una referencia previa de la clase a la que pertenecen, las cuales contribuyen a la generación de una firma espectral, que caracterizan cada clase, formando un conjunto de reflexibilidades para cada banda acompañada de análisis estadísticos.

4.3.1 Clasificación de coberturas

En este estudio, se asignaron 105 puntos de muestreo para la colección de imágenes del año 2019 (Anexo 1) y 105 puntos de muestreo para la colección de imágenes del año 2022 (Anexo 2), considerando que el área de estudio tiene una superficie de 196,748.44 ha, la distancia de punto a punto en el año 2019 fue de 5,500 m en promedio y del año 2022 el muestreo se distribuyó a una distancia de 6,700 m en promedio, con lo que se evita la autocorrelación espacial.

Posteriormente se asignaron las áreas de entrenamiento o clases, ubicadas en campo con GPS y en Google Earth Pro para realizar la clasificación digital con una combinación de banda 4:3:2, el cual degrada mejor la cobertura vegetal de los suelos desnudos (Chuvieco, 1996).

A modo de referencia, y considerando que es importante conocer los tipos de vegetación y uso de suelo del área de análisis, fue necesario categorizar las clases de uso de suelo en tres tipos, la primera como “**Terreno con vegetación forestal**” con el código 1, en la que se incluyen las clases: la selva baja caducifolia, bosque de encino, selva baja espinosa caducifolia, tular,

vegetación halófila hidrófila, así como la vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa caducifolia, que existen en el área de estudio. La segunda clase se denominó como “**Terreno de cultivo**” con el código 2, englobando a la agricultura de riego anual, agricultura de riego anual y semipermanente, agricultura de riego permanente, agricultura de riego semipermanente, agricultura de temporal anual y pastizal cultivado, que durante el periodo de enero a mayo, tanto del año 2019 y 2022, estuvieron cultivadas. Finalmente, la tercera clase se nombró “**Terreno sin vegetación**” con el código 3, donde se incluye el suelo desnudo, uso urbano construido, infraestructura y terrenos que tengan una reducción permanente de la cobertura de copa por debajo del umbral del diez por ciento, este ultimo de acuerdo a la fracción XVII de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS, 2021).

Cuadro 4. Clases de uso de suelo y códigos.

Clase	Código
Terreno con vegetación forestal	1
Terreno con cultivo	2
Terreno sin vegetación	3

En la Figura 17, se observan las 3 clases que se usaron para diferenciar y determinar la deforestación en la subcuenca hidrográfica Río Pericos.

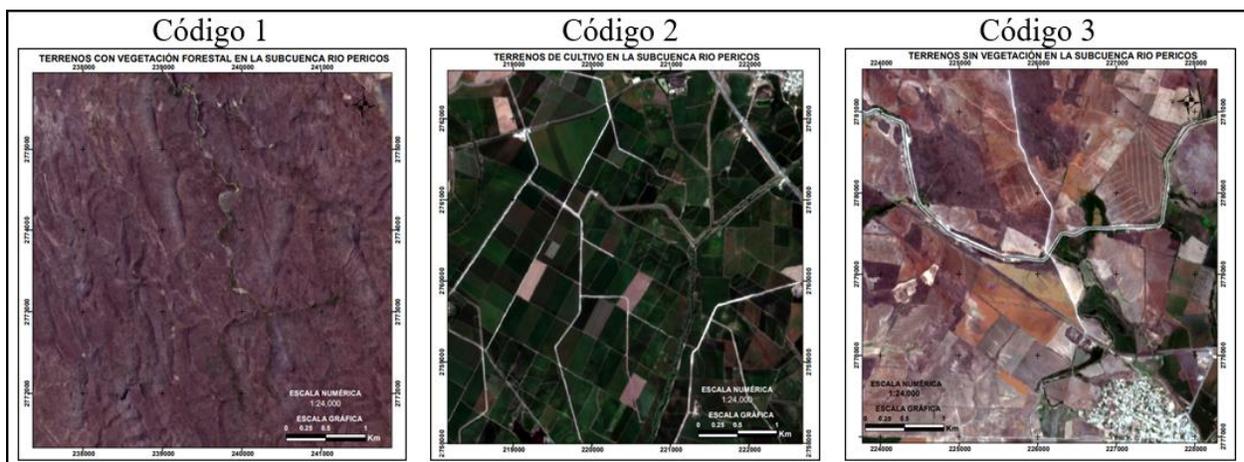


Figura 17. Comparativa de las diferentes clases de terrenos en la subcuenca Río Pericos.

Para este análisis no se realizó un pre-procesamiento de imágenes, ya que el satélite Sentinel nivel 2-A, se encuentra corregido atmosféricamente a nivel del suelo (BOA), ofreciendo datos de reflectancia más próximos a la realidad (y por tanto con niveles de color más realistas). Las imágenes de nivel 2A son más nítidas, con mayor brillo, contraste y no presentan la textura blanquecina producida por el efecto de la presencia de la atmósfera (Gisadminbeers, 2019b).

4.3.1 Clasificación por máxima verosimilitud

Puesto que se tiene una muestra de reflectividades para cada clase y cada banda, puede calcularse la media y la desviación típica de cada una de las clases, y utilizar algún modelo de distribución de probabilidad. El clasificador de máxima probabilidad asume que los datos siguen una función de distribución normal para asignar la probabilidad de que un pixel cualquiera pertenezca a cada una de las clases. El pixel se asigna de este modo a la clase a la que es más probable que pertenezca (Sarría, 2014).

Este método puede usarse de forma automática, o puede establecerse algún criterio que permita asignar pixels a una clase sólo si la probabilidad correspondiente es superior a determinado umbral (Sarría, 2014). Por otro lado, permite definir algún tipo de criterio para medir la calidad de la asignación, por ejemplo, la diferencia entre la máxima probabilidad y la siguiente.

En la Figura 18 aparecen una serie de elipses rodeando a cada uno de los centroides, se trata de líneas de isoprobabilidad, por tanto el pixel se clasificará como perteneciente a la clase en la que sus valores resultan más probables.

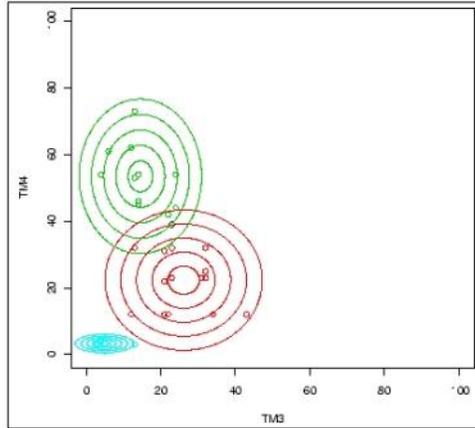


Figura 18. Clasificación por máxima probabilidad.

Esri (2019) en su plataforma, menciona que el algoritmo utilizado por la herramienta de clasificación de máxima verosimilitud (Maximum Likelihood Classification) en ArcGIS, se basa en dos principios: Las celdas de cada muestra de clase en el espacio multidimensional se distribuyen normalmente y el Teorema de Bayes para la toma de decisiones e indica que al elegir la opción “muestra” en inglés (Sample) a priori, las probabilidades *a priori* asignadas a todas las clases muestreadas en el archivo de firma de entrada son proporcionales al número de celdas capturadas en cada firma. En consecuencia, las clases que tienen menos celdas que el promedio en la muestra reciben ponderaciones por debajo del promedio, y aquellas con más celdas reciben ponderaciones mayores que el promedio. Como resultado, las clases respectivas tienen más o menos celdas asignadas.

4.3.2 Validación de los resultados

Un método simple y apropiado de evaluaciones de los errores es utilizar la matriz de confusión de clases. Laurente (2009) indica que la validación o verificación de clasificación se efectúa mediante la creación de matrices denominadas de confusión, formadas a partir del cruzamiento de la información generada por la clasificación y del muestreo. Para determinar la información del muestreo se generó una distribución al azar de puntos considerando toda el área de estudio y posteriormente se atribuye a cada punto la categoría considerada correcta. El número de puntos de muestra se obtiene mediante la fórmula binomial (acierto y error) definida por:

$$N = \frac{Z^2 pq}{E^2}$$

Formula Binomial (acierto y error).

Entonces

$$N = \frac{1.96^2 \cdot 0.95 \cdot 0.05}{0.05^2} = 72.99 = 73 \text{ sitios}$$

Donde Z = curva normal para un nivel determinado de probabilidad, en este caso 95 %; p = porcentaje de aciertos estimado; q = errores ($q=1-p$) y E = nivel permitido de error (Chuvieco, 1996).

Para la determinación de la información de los sitios de muestreo, según la formula binomial, se requirieron 73 sitios, sin embargo, para tener mayor certeza en los resultados, se realizaron 105 sitios distribuidos al azar sobre la imagen “Año2019 y 105 sitios para la imagen “Año2022”. Estos sitios fueron verificados mediante salidas al campo; los sitios donde no se pudo llegar, se corroboró su cobertura con imágenes actuales del programa Google Earth Pro, que presentan mayor resolución espacial. Este tipo de análisis obtiene una caracterización del error cometido y una medida sobre la adecuación de las clases consideradas a la realidad.

Se obtuvo una matriz de confusión con los conflictos entre categorías y sitios de muestreo. Se aplicó el Índice Kappa el grado de concordancia de los resultados obtenidos de las marginales de la clasificación (Chuvieco, 1996).

Cuadro 5. Valores de Kappa para medir el grado de concordancia.

Kappa	Grado de concordancia
< 0.20	Mala
0.21-0.40	Ligera
0.41-0.60	Moderada
0.61-0.80	Buena
0.81-1.00	Excelente

Fuente: (Chávez, 2006).

4.3.3 Vectorización

Se realizó una transformación de la capa de clasificación en formato raster a vector, es decir, de píxeles a polígonos, a los cuales se les puede medir la superficie ocupada.

Se tomó en consideración a los criterios que se mencionan en las definiciones de cada clase, y se procedió a la eliminación de las áreas que no debían ser consideradas en el estudio, esto incluyó a los polígonos con superficies menores a 1,500 m². Lo anterior con base a la LGDFS que indica que las áreas que no clasifican con esta característica, no son consideradas como terrenos forestales arbolados, por tanto, no entran en la clase de “Terreno con vegetación forestal”.

Con la intención de realizar una clasificación efectiva, en este análisis se consideró como **“Terreno con vegetación forestal”**, todo aquel terreno en el que exista un conjunto de plantas y hongos que crecen y se desarrollan en forma natural, dando lugar al desarrollo y convivencia equilibrada de otros recursos y procesos naturales, así como aquellas que surgen de manera espontánea como proceso de sucesión o recuperación en zonas donde ha habido algún impacto natural o antropogénico. De esta manera, se incluye la clasificación de **“Terreno sin vegetación”**, que son aquellos terrenos en los que se ha removido total o parcialmente la vegetación forestal de los terrenos forestales arbolados o de otros terrenos forestales para actividades no forestales por causas inducidas o naturales, o bien, que se ha reducido permanente la cobertura de copa por debajo del umbral del 10 %. Si la vegetación no se extiende por más de 1,500 m² con árboles dotados de una altura superior a 5 m y una cobertura de copa superior al 10 %, o de árboles capaces de alcanzar esta altura in situ, no es considerado como terreno forestal arbolado o vegetación forestal, ni aquel terreno que se considere como acahual, al no entrar en la clase de vegetación forestal de selva, ya que la LGDFS lo excluye. Por otro lado, un **“terreno de cultivo”**, o tierra de cultivo, es definido por el IPCC (2006) como la *“tierra cultivada, incluidos los arrozales y los sistemas de agro-silvicultura donde la estructura de la vegetación se encuentra por debajo de los umbrales utilizados para la categoría de tierras forestales”* pudiéndole incluir, de acuerdo a las características del área de estudio, también a los cultivos de maíz, frijol, garbanzo, huertas de mango, pastizales inducidos, etc. En estos terrenos ya ha sucedido la conversión de terrenos forestales a terrenos deforestados, ya sea por causas inducidas o naturales.

4.3.4 Unificación de los mapas

Después de los polígonos clasificados, vectorizados y eliminados aquellos no considerados como terrenos con vegetación forestal, se procedió a unir los dos mapas y códigos de los años (2019 y 2012) mediante la función de unión de ArcGis 10.5, en el que se analizó, determinó y midió la superficie total deforestada a partir de enero del año 2019 a mayo del 2022. En el Cuadro 6 se observa que de acuerdo al código unido, el ArcGis muestra la descripción o uso en que se encuentre de enero a mayo del 2022, indicando que si durante el 2019 al 2022 el área fue deforestada, se identifica con los códigos 12 y 13; si no hubo cambios entre esas fechas, es decir, persistió en la misma condición, código 11, 22 y 33; si tuvo alguna revegetación o recuperación se le asignaron los códigos 21 y 31; y finalmente, si solo se trató de un área de cultivo se les identificó con los código 23 y 32.

Cuadro 6. Clasificación de los terrenos, códigos y descripción del terreno.

Año 2019	Año 2022	Códigos unidos	Descripción
Terreno con vegetación forestal	Terreno con vegetación forestal	11	Vegetación
Terreno con vegetación forestal	Terreno con cultivo	12	Deforestación
Terreno con vegetación forestal	Terreno sin vegetación	13	Deforestación
Terreno con cultivo	Terreno con vegetación forestal	21	Revegetación
Terreno con cultivo	Terreno con cultivo	22	Agrícola
Terreno con cultivo	Terreno sin vegetación	23	Agrícola
Terreno sin vegetación	Terreno con vegetación forestal	31	Revegetación
Terreno sin vegetación	Terreno con cultivo	32	Agrícola
Terreno sin vegetación	Terreno sin vegetación	33	Sin vegetación

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado de la metodología, se determinó, a partir de la clasificación de dos conjuntos de imágenes, que en el año 2019 existían 85,079.78 ha de terrenos con vegetación forestal, en los terrenos de cultivo 46,848.18 ha y en los terrenos sin vegetación 64,820.47; para el año 2022, se tenían 59,147.52 ha de terrenos con vegetación forestal, 37,998.55 de terrenos de cultivo y

99,602.37 de terrenos sin vegetación y una revegetación de 3,957.14 ha, realizándose el análisis de la pérdida de cobertura de la vegetación forestal.

La unificación entre los mapas “Año2019” y “Año2022” permitió seleccionar los polígonos con deforestación que se identificaron con los códigos 12 y 13 (Figura 19).

La diferencia de cobertura forestal indica que de enero del 2019 a mayo del 2022, se deforestaron 29,889.40 ha, en 19,972 polígonos con una superficie 0.0100 ha, lo cual corresponde a 15.19 % de la subcuenca Río Pericos, como se observa en el Cuadro 7 y Figura 19.

Cuadro 7. Número de polígonos y área deforestada.

Área de la subcuenca	Área deforestada (ha)	Polígonos deforestados (No)	Área deforestada en la subcuenca (%)
196,748.44	29,889.40	19,972	15.19

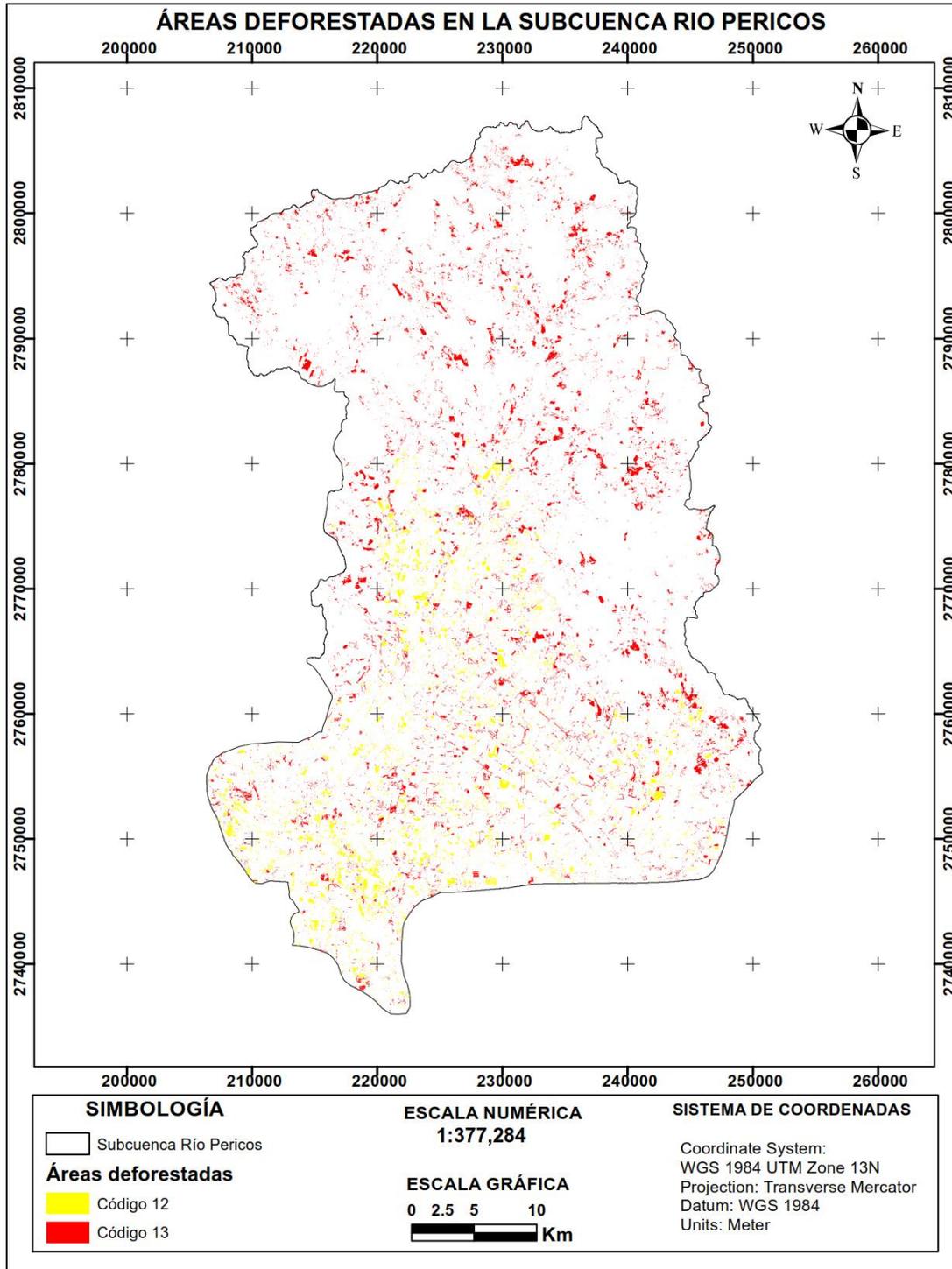


Figura 19. Plano de pérdida cobertura forestal (2019-2022).

De las 29,889.40 ha que se deforestaron, el municipio con más deforestación fue Mocoquito con 13,510.70 ha en 7,761 polígonos, sin embargo, es de tomarse en cuenta que también tiene mayor superficie. Por otro lado, el municipio con menos deforestación fue Salvador Alvarado con 204 ha en 51 polígonos. Si se analiza el porcentaje del área deforestada con relación al área del municipio, se observa que Navolato tiene el mayor porcentaje con el 19.53 %. En cambio, el Municipio de Badiraguato tiene el menor con 13.47 % (Cuadro 8).

Cuadro 8. Áreas deforestadas, cantidad de polígonos y porcentajes en los municipios estudiados.

Municipio	Área del municipio (ha)	Área deforestada (ha)	Polígonos deforestados (No)	Área deforestada (%)	Área deforestada en la subcuenca (%)	Área deforestada/municipio (%)
Culiacán	36,522.13	5,220.30	4,247	17.47	2.65	14.29
Navolato	40,783.39	7,964.40	6,901	26.65	4.05	19.53
Salvador Alvarado	1,350.57	204.00	51	0.68	0.10	15.11
Mocoquito	95,894.99	13,510.70	7,761	45.20	6.87	14.09
Badiraguato	22,197.36	2,989.90	1,171	10.00	1.52	13.47
Total	196,748.44	29,889.40	20,131	100.00	15.19	

Nótese que del Cuadro 6, existen 19,972 polígonos deforestados, sin embargo, al realizar la combinación de la capa de los municipios, para obtener el resultado por municipio, existen polígonos deforestados que se dividieron por ser parte de dos municipios. Esto causó la división de algunos polígonos, por lo que aumentaron a 20,131; es decir, 159 polígonos más.

El Cuadro 8 presenta el número de polígonos y superficie deforestada de acuerdo a los códigos 12 y 13, que son los que indicaron las áreas deforestadas. El código 12 “cambió de uso con vegetación forestal a terreno con cultivo”, significa que y el código 13, que “el terreno con vegetación forestal cambió a terreno sin vegetación”.

De acuerdo a la clasificación por código, se tiene que Navolato presentó mayor superficie deforestada con el código 12, presentando 2,181.60 ha en 2,686 polígonos, mientras que el área

deforestada con el código 13 presentó mayor superficie en el Municipio de Mocorito con 12,157.50 ha en 5,988 polígonos.

Cuadro 9. Superficie deforestada de acuerdo a los códigos y polígonos en cada municipio.

Municipio	Código	Polígonos	Superficie (Ha)
Culiacán	12	1,102	687.30
	13	3,145	4,533.10
Navolato	12	2,686	2,181.60
	13	4,215	5,782.80
Salvador Alvarado	12	0	0.00
	13	51	204.00
Mocorito	12	1,773	1,353.20
	13	5,988	12,157.50
Badiraguato	12	5	5.50
	13	1,166	2,984.40
Total		20,131	29,889.40

En las áreas con código 12 (Cuadro 9), se deforestaron 4,227.60 ha en 5,566 polígonos, habiendo mayor área deforestada en el Municipio de Navolato y sin nada de deforestación en el Municipio de Salvador Alvarado y en las áreas con código 13 se deforestaron 25,661.80 ha en 14,565 polígonos, habiendo mayor área deforestada en el Municipio de Mocorito y con 204 ha con deforestación en el Municipio de Salvador Alvarado.

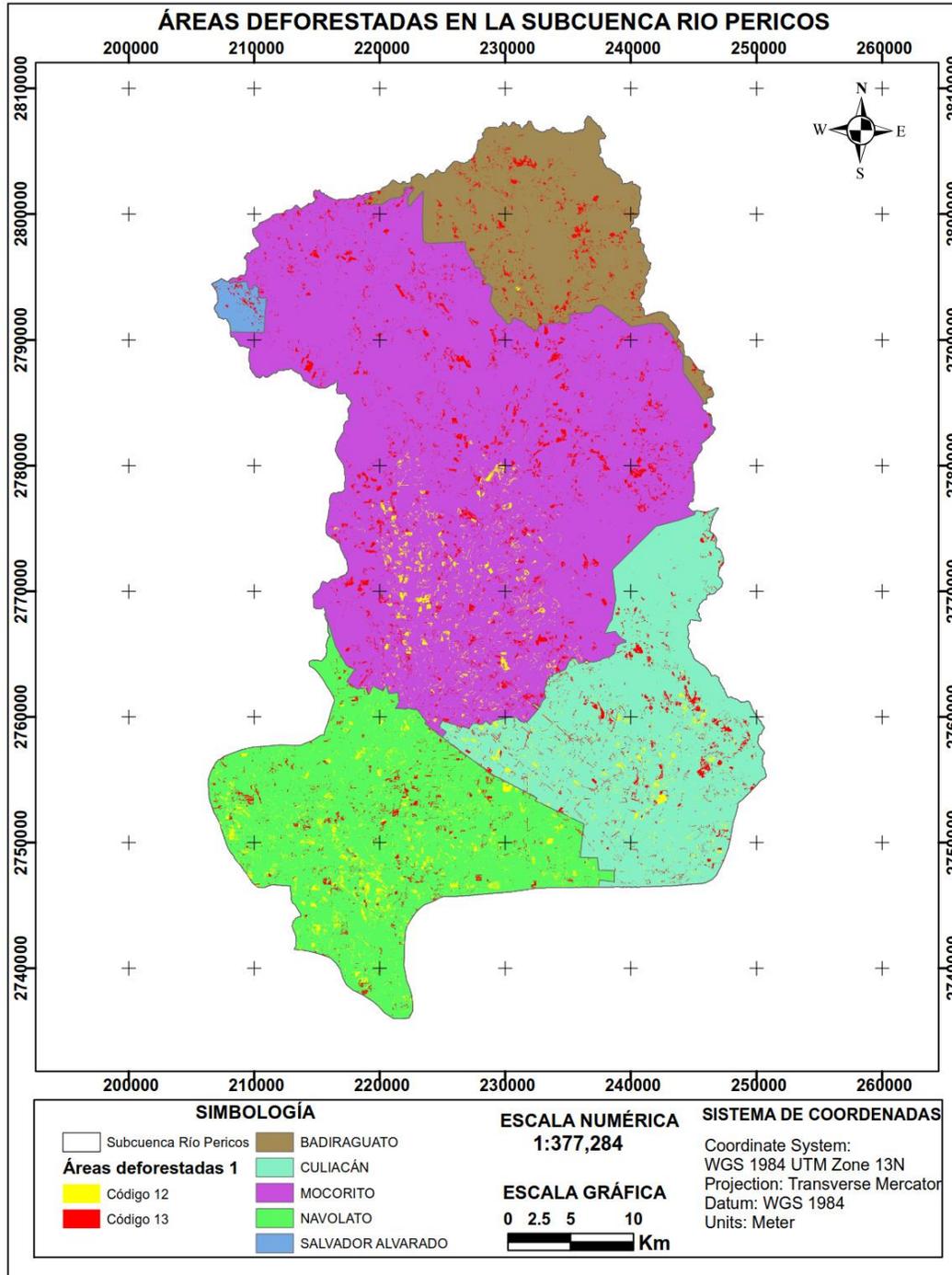


Figura 20. Deforestación por municipio en la subcuenca Río Pericos.

Con el interés de conocer la confiabilidad del método de clasificación, se elaboró la matriz de confusión con los sitios verificados.

En los Cuadros 10 y 11 se observan los valores de comprobación, en la diagonal de la matriz se indica el número de puntos de verificación entre el mapa y la realidad, mientras que las

marginales suponen errores de asignación. Las filas se ocupan por las clases de referencia (terreno) y las columnas por las categorías deducidas en la clasificación.

Cuadro 10. Matriz de confusión 2019.

Clases	Terreno con vegetación forestal	Terreno de cultivo	Terreno sin vegetación	Total	Precisión
Terreno con vegetación forestal	35	0	0	35	100.00
Terreno de cultivo	0	35	0	35	100.00
Terreno sin vegetación	0	0	35	35	100.00
Total	35	35	35	105	100.00

Cuadro 11. Matriz de confusión 2022.

Clases	Terreno con vegetación forestal	Terreno de cultivo	Terreno sin vegetación	Total	Precisión
Terreno con vegetación forestal	35	0	0	35	100.00
Terreno de cultivo	0	34	0	34	100.00
Terreno sin vegetación	0	1	35	36	97.22
Total	35	35	35	105	99.04

Con los datos especificados anteriormente se obtuvo el índice de Kappa global para cada año.

$$P_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M n_{i,i}$$

Formula de Índice de Kappa global.

Cálculo para la matriz 2019

$$P_a = \frac{1}{105} (35+35+35) = 1.0$$

Cálculo para la matriz año 2022

$$P_a = \frac{1}{105} (35+34+35) = 0.990$$

El Índice de Kappa indicó un valor de 1,00 en la matriz 2019 y 0.990 para la matriz 2022; ambos resultados se encuentran en el intervalo de 0,81-1,00, que se considera como de calidad excelente (Tabla 4).

5.1 Discusión

El Municipio de Navolato y la parte sur de los polígonos de los Municipio de Mocorito y Culiacán, se presenta una deforestación medianamente considerable, sin embargo, son polígonos que están en forma segregada, por lo que no conformaban grandes masas de vegetación forestal. Esto se debe a que fueron quedando áreas rodeadas de terrenos agrícolas. Por otro lado, los municipios que contienen extensiones grandes de vegetación forestal, al noreste de la subcuenca Río Pericos, y que a su vez presentaron superficies grandes de deforestación, requieren una intervención oportuna que considere acciones que protejan y se mantenga la subcuenca hidrográfica, más allá de las fronteras administrativas.

En estudios posteriores, es importante realizar consultas a los habitantes de las áreas más afectadas, necesariamente en las partes de la sierra donde se practica la agricultura, produciendo un análisis más fuerte de los factores causales de la deforestación. No obstante, considerando la caracterización biofísica de la zona de estudio, algunos de los factores causales de la deforestación es la existencia de una gran cantidad de caminos y carreteras, además por su poca existencia de pendientes pronunciadas, hacen fácil el acceso casi a cualquier lugar de la subcuenca. Por ello, es importante monitorear zonas con características similares que cuenten con planicies, llanuras y sierra baja en su mayoría, ya que las convierte en tierras aptas para la agricultura, lo que aumenta el interés para los agricultores.

El funcionamiento de GEE no acaba con la capacidad de la memoria del computador, pero necesita tener una conexión estable a internet para poder cargar el algoritmo, las imágenes y la información solicitada y descargar los resultados de la nube a la computadora. Adicionalmente, se requiere espacio suficiente disponible en el Google Drive para la descarga de grandes cantidades de imágenes (la versión gratuita permite hasta 15 gigabytes). En el caso que se requiera usar GEE con fines lucrativos, o que no estén dirigidos a la educación e investigación, se deberá pagar una licencia (Perilla et al. 2020). Además, GEE no permite la descarga de la imagen satelital con más de 100, 000,000 píxeles.

Determinar la cantidad de área deforestada y su ubicación, alerta e incita a trabajar en la restauración, informa cuál es la tendencia y grado de afectación, da pauta de las causas y da idea de las consecuencias futuras. No obstante, no detiene, retrasa o ataca directamente a la causa principal de la deforestación. Lo anterior indica que se debería trabajar en un método o sistema, con el que se detecte la deforestación en tiempo casi real, que contribuya a que las autoridades competentes actúen en tiempo y en forma. Fortalecer la detección de la deforestación por medio del análisis multitemporal de imágenes satelitales, permitirá aplicar las sanciones que la legislación determina para los infractores y detener drásticamente la deforestación.

VI. CONCLUSIONES

Objetivo particular: Diseñar una metodología factible de ser adoptada por diferentes organismos gubernamentales para la detección de las deforestaciones a corto plazo.

Se necesitan programas o modelos que detecten la deforestación, si no en tiempo real, en tiempo casi real, y que la autoridad competente pueda actuar de manera oportuna y eficaz, ya que en la actualidad las dependencias no cuentan con recursos económicos, ni de personal para realizar inspecciones periódicas. El método usado en el estudio puede determinar deforestación con imágenes multitemporales para medir las deforestaciones históricas, pero también para detectar la deforestación con 15 días de retraso, la cual podría utilizarse para detectar en tiempo casi real y ser usada por las autoridades para sancionar aquellos que remuevan la vegetación forestal sin autorización. El utilizar el programa de GEE fue de bastante utilidad, al agilizar la selección de imágenes satelitales mediante el armado de un algoritmo con el que se ordenó que indicara las imágenes en un intervalo de fecha de enero a mayo del 2019 y enero a mayo del 2022. Además, que las presentara en una colección de imágenes con menos de 30 % de nubosidad, lo que llevo a obtener imágenes sin nubes. Es importante indicar que cualquier persona con conocimientos básicos de programación y con acceso a internet puede ingresar al programa de Google Earth Engine y realizar investigaciones utilizando grandes cantidades de datos, lo que permite impulsar una comunidad e investigación más igualitaria y libre. Por último, la obtención de resultados de superficies deforestadas, mediante cartografía de Uso de Suelo y Vegetación proporcionadas por INEGI, a diferencia del método propuesto no discrimina áreas pequeñas forestales o no forestales y segregadas, no redondea o suaviza los polígonos, y puede detectar las deforestaciones a partir de 100 m² en adelante, así como la expansión y apertura de parcelas y caminos, no necesita

mucho personal, recursos, ni tiempo para llevarlo a cabo, con solo un equipo de cómputo con acceso a internet, imágenes satelitales adquiridas y un sistema de información geográfica fue posible medir y detectar las áreas deforestadas en la subcuenca Río Pericos. Con las herramientas mencionadas en 1 día se puede identificar áreas muy extensas de deforestación.

Objetivo particular: Determinar la superficie y ubicación de polígonos deforestados durante 3 años en la subcuenca hidrográfica Río Pericos, mediante el análisis multitemporal de imágenes del satélite Sentinel-2A en ArcGis 10.5.

Se utilizaron imágenes del satélite Sentinel 2 nivel 2A para medir la deforestación en la subcuenca Río Pericos, este tipo de imágenes no requiere ningún tipo de corrección atmosférica a nivel del suelo, ya que ofreció datos de reflectancia próximos a la realidad. La deforestación por año fue de 9,963 ha con el 5.06 % para la subcuenca del Río Pericos, asumiendo el proceso de pérdida de la cobertura forestal. Esta velocidad de deforestación, se debería de plantear estrategias por las autoridades correspondientes, para que se mitigue este fenómeno o contemplar planes de reforestación, ya que en 20 años más se tendría la totalidad de la subcuenca deforestada. La validación de los resultados de clasificación digital, específicamente para el año 2019 fue de 100 % de exactitud global y con un índice de kappa de 1.00. Para el año 2022 fue del 99 % de exactitud global y un índice de kappa de 0.990 que muestra la calidad de la clasificación. Los municipios de Mocorito y Culiacán fueron los que tuvieron mayor área deforestada, ya que son los que mayor superficie abarcan en la subcuenca, además, están en la frontera agrícola y presentan vegetación forestal, por lo que los hace prioritarios para tomarse en cuenta en proyectos de reforestación y conservación.

VII. LITERATURA CITADA

- Albornoz, A., Alegría, D., Cortés, F., & Moya, J. (2021). *Protocolo metodológico para la elaboración de cartografías de usos y cambios de usos de la tierra*. FAO y MINAGRI. <https://doi.org/10.4060/cb0845es>
- Alva, W., & Chávez, T. (2004). *Manual: Procesamiento digital de imágenes*. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Balvanera, Castellarini, Pacheco, & Carrillo. (2008). «*Escurrimiento natural medio superficial*», *escala: 1:1000000*. Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIEco), Universidad Nacional Autónoma de México Campus Morelia. Proyecto: FQ003, Extraído del proyecto FQ003: *Servicios Ecosistémicos de México: Patrones, tendencias y prioridades de investigación. Financiado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) México, DF.*
- Bonan, G. B. (2008a). Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Bonan, G. B. (2008b). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Caicedo, W. B. (2021). *Análisis multitemporal de deforestación de manglares en la Isla Puná-Ecuador, utilizando SIG y teledetección*. Universidad de Salzburg.
- Calzada, E. O. (2016). *Aplicación de Percepción Remota para el Estudio de Áreas con un Potencial Geotérmico*. [Tesis]. Centro Público de Investigación CONACYT.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2020). *Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2022). *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*.
- Carstairs, H., Mitchard, E. T. A., McNicol, I., Aquino, C., Burt, A., Ebanega, M. O., Dikongo, A. M., Bueso-Bello, J. L., & Disney, M. (2022). An Effective Method for InSAR Mapping of Tropical Forest Degradation in Hilly Areas. *Remote Sensing*, 14(3), 1-24. <https://doi.org/10.3390/rs14030452>
- Chávez. (2006). *Determinación de suelos degradados mediante técnicas de teledetección en la Microcuenca Río Delfín en Pozuzo*. [Tesis Ing. Recursos Naturales Renovables.]. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección espacial*. Ediciones RIALP, S.A.
- Chuvieco, E. (2000). *Fundamentos de teledetección espacial*. (Ediciones Rialp.).
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ed. Ariel Ciencia.

- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental* (3a. edición actualizada). Ariel S.A.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio* (Ariel Ciencias).
- Comisión Europea. (2018). *El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial*.
- CONABIO. (1997). «*Provincias biogeográficas de México*». Escala 1:4 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONABIO. (2020). *Maderable*. Biodiversidad Mexicana.
<https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/maderable>
- CONABIO. (2022, enero 10). *Portal de Información Geográfica—CONABIO*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAFOR. (2020). *Estimación de la tasa de deforestación bruta en México para el periodo 2001-2018 mediante el método de muestreo. Documento Técnico*. Jalisco, México.
- Congalton, G., & Green, K. (1999). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*. Lewis Publishers.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., & Lambin, E. (2004). Digital change detection methods in ecosystem monitoring: A review. *Int. J. Remote Sens.*
- Dal Molin, R., & Rizzoli, P. (2022). Potential of Convolutional Neural Networks for Forest Mapping Using Sentinel-1 Interferometric Short Time Series. *Remote Sensing*, 14(6), 1381. <https://doi.org/10.3390/rs14061381>
- DeFries, R. S., Houghton, R. A., Hansen, M. C., Field, C. B., Skole, D., & Townshend, J. (2002). Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(22), 14256-14261.
<https://doi.org/10.1073/pnas.182560099>
- Esri. (2019). *Cómo funciona la clasificación de máxima verosimilitud—Ayuda | Escritorio de ArcGIS*. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.6/tools/spatial-analyst-toolbox/how-maximum-likelihood-classification-works.htm>
- FAO. (2021). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020*. FAO.
<https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- Fundación Vida Silvestre Argentina. (2022). *¿Cuál es el problema?*
<http://www.vidasilvestre.org.ar>
- Galindo, Vergara L.K., Cabrera E., & Espejo O.J. (2014). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia. V 2.0*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

- Gates, M., Keegan, J., Schleter, C., & Weidner, R. (1965). *Spectral properties of plants, applied Optics*.
- Gisadminbeers. (2019a, marzo 30). Imágenes Sentinel 2 nivel 2A en Google Earth Engine. *Gis&Beers*. <http://www.gisandbeers.com/imagenes-sentinel-2-nivel-2a-google-earth-engine/>
- Gisadminbeers. (2019b, diciembre 21). Todo lo que deberías saber sobre imágenes Sentinel 2. *Gis&Beers*. <http://www.gisandbeers.com/lo-deberias-saber-imagenes-sentinel-2/>
- Gisadminbeers. (2020, enero 5). ¿Cuál es la mejor imagen satélite para usar? *Gis&Beers*. <http://www.gisandbeers.com/descargar-la-mejor-imagen-satelite-usar/>
- Gis&Beers. (2020). ¿Cuál es la mejor imagen satélite para usar? - *Gis&Beers*. <http://www.gisandbeers.com/descargar-la-mejor-imagen-satelite-usar/>
- GÜNDOĞDU, B., ERDOĞAN, H., & OKTAR, O. (2021). Investigation of Disasters with Different InSAR Methods. *Turkish Journal of Geosciences*, 1740, 33-45. <https://doi.org/10.48053/turkgeo.945892>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, 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*. 850(November), 850-854. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hansen, M. C., Stehman, S. V., & Potapov, P. V. (2010). Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(19), 8650-8655. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912668107>
- Hernández, J. (2016). *Patrones de respuesta espectral*.
- INEGI. (2022a). *Clima. Sinaloa*. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/sin/territorio/clima.aspx?tema=me&e=25>
- INEGI. (2022b). *Relieve. Sinaloa. Cuentame*. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/sin/territorio/relieve.aspx?tema=me&e=25>
- INEGI. (2022c). *SIATL v4 | Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*.
- Jiménez, S. C. L., Cortés, C. P., Breceda, S. C. A., Ñíguez, D. L. I., & Ortega, R. A. (2014). *México país megadiverso y la relevancia de las áreas naturales protegidas. Investigación y Ciencia [Tesina]*.

- Jong, S. M. de, Meer, F. D. van der, & Clevers, J. G. P. W. (2004). *Basics of Remote Sensing*. 1-15. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2560-0_1
- Kanninen, D., Murdiyarto, D., Seymour, F., Algelsen, A., Wunder, S., & German, L. (2007). *Do trees grow on money? The implication of deforestation research for policies to promote REED*. CIFOR.
- Karszenbaum, H. (2005). *Protocolo procesamiento de imágenes satelitales Landsat*.
- 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>
- Laurente, M. Á. (2009). *Medición de deforestación e índice de vegetación de diferencia normalizada, mediante percepción remota en la microcuenca Río Supte*. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- LGDFS. (2021). *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*.
- Liang, J., Dong, J., Zhang, S., Zhao, C., Liu, B., Yang, L., Yan, S., & Ma, X. (2022). *Discussion on InSAR Identification Effectivity of Potential Landslides and Factors That Influence the Effectivity*. 1-19.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). Remote Sensing and Image Interpretation. 7th Edition. En *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (Vol. 81, Número 8). <https://doi.org/10.14358/pers.81.8.615>
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. (2004). Change Detection Techniques. *International Journal of Remote Sensing*.
- Madrid, L., Núñez, J. M., & Quiroz, G. (2009). *La propiedad social forestal en México*. 18.
- Maubant, L., Radiguet, M., Pathier, E., Doin, M.-P., Cotte, N., Kazachkina, E., & Kostoglodov, V. (2022). Interseismic coupling along the Mexican subduction zone seen by InSAR and GNSS. *Earth and Planetary Science Letters*, 586(April), 117534. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117534>
- Meidinger, D. (2003). *Protocol for accuracy assessment of ecosystem maps B.C. Ministry of Forests*.
- Miura, S., Amacher, M., Hofer, T., San-Miguel-Ayanz, J., Ernawati, & Thackway, R. (2015). Protective functions and ecosystem services of global forests in the past quarter-century. *Forest Ecology and Management*, 352, 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.039>
- Monjardín, S. A., Pacheco-Angulo, C. E., Plata-Rocha, W., & Corrales-Barraza, G. (2017). La deforestación y sus factores causales en el estado de Sinaloa, México. *Madera y Bosques*, 23(1), 7. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311482>

- Morales, A. (2020, enero 30). Google Earth Engine y cómo acceder a sus algoritmos desde QGIS. *MappingGIS*. <https://mappinggis.com/2020/01/google-earth-engine-y-como-acceder-a-sus-algoritmos-desde-qgis/>
- NASA. (2004). *National Aeronautics and space Administration*. <http://www.nasa.gov/home/index.html>
- National Geographic Society. (2021). *La deforestación del Amazonas alcanza niveles históricos debido al consumo de carne*. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2020/06/deforestacion-amazonas-alcanza-niveles-historicos-debido-consumo-carne>
- Pacheco, C., Aguado, I., Vilanova, D., & Martínez, S. (2012). *Utilización de las tecnologías de la información geográfica (TIG) en el desarrollo de un sistema de medición, reporte y verificación (MRV) de emisiones de CO2 en tres áreas "hot spot" de deforestación en Venezuela*.
- Pepin, K. S., Ellsworth, W. L., Sheng, Y., & Zebker, H. A. (2022). Shallow Aseismic Slip in the Delaware Basin Determined by Sentinel-1 InSAR. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(2), 1-20. <https://doi.org/10.1029/2021JB023157>
- Perilla, G. A., Mas, J.-F., Perilla, G. A., & Mas, J.-F. (2020). Google Earth Engine (GEE): Una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones geográficas*, 101. <https://doi.org/10.14350/rig.59929>
- Pulella, A., Sica, F., & Rizzoli, P. (2020). Monthly deforestation monitoring with sentinel-1 multi-temporal signatures and InSAR coherences. *Revista de Teledeteccion*, 2020(56), 1-22. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.14308>
- Reuter, F. (2009). *Principios de teledetección*. 74.
- Romero, H. D., & López, B. J. (2000). Producción e integración de fotomapas digitales para la evaluación del crecimiento urbano en el municipio de Texcoco, Estado de México: Período 1970-1989-1997. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía UNAM.*, 42,48-66.
- Romijn, E., Lantican, C. B., Herold, M., Lindquist, E., Ochieng, R., Wijaya, A., Murdiyarso, D., & Verchot, L. (2015). *Assessing change in national forest monitoring capacities of 99 tropical countries*. Forest Ecology and Management.
- Sánchez, P. (2002). *La teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales*. Cuenca.
- Sarría, F. A. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. 239.
- SEGOB. (2020, diciembre 31). *Programa Nacional Forestal 2020-2024*. DOF - Diario Oficial de la Federación. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609275&fecha=31/12/2020

- Siles, G. L., Alcérreca-Huerta, J. C., López-Quiroz, P., & Hernández, J. C. (2015). On the potential of time series InSAR for subsidence and ground rupture evaluation: Application to Texcoco and Cuautitlan–Pachuca subbasins, northern Valley of Mexico. *Natural Hazards*, 79(2), 1091-1110. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1894-4>
- SMN. (2020, mayo 14). *Servicio Meteorológico Nacional*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>
- The European Space Agency. (2015). *SENTINEL 2*. https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2
- Tristan, P. M., Wainschenker, R. S., & Doorn, J. H. (2008). *Normalización de Imágenes Satelitales en el Análisis Multi-Temporal*. 5.
- Yang, Y. J., Hwang, C., Hung, W. C., Fuhrmann, T., Chen, Y. A., & Wei, S. H. (2019). Surface deformation from sentinel-1A InSAR: Relation to seasonal groundwater extraction and rainfall in central Taiwan. *Remote Sensing*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/rs11232817>
- Zhang, L., Dai, K., Deng, J., Ge, D., Liang, R., Li, W., & Xu, Q. (2021). Identifying potential landslides by stacking-insar in southwestern china and its performance comparison with sbas-insar. *Remote Sensing*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/rs13183662>
- Ziwen, Z., Liu, Y., Li, F., Li, Q., & Ye, W. (2019). Land subsidence monitoring based on InSAR and inversion of aquifer parameters. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019(1). <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1602-2>

ANEXOS

Anexo 1.

Puntos de muestreo en la imagen del 1 de enero al 30 de mayo de 2019 en la subcuenca Río Pericos.

No.	Cantidad por clase	Clase	Descripción	UTM X	UTM Y
1	1	1	Terreno con vegetación forestal	208154.475	2791768.101
2	2	1	Terreno con vegetación forestal	210330.094	2789437.080
3	3	1	Terreno con vegetación forestal	211320.778	2791418.448
4	4	1	Terreno con vegetación forestal	214642.484	2793030.738
5	5	1	Terreno con vegetación forestal	211068.251	2797479.104
6	6	1	Terreno con vegetación forestal	213379.847	2797887.032
7	7	1	Terreno con vegetación forestal	217750.512	2799518.747
8	8	1	Terreno con vegetación forestal	218566.370	2795478.310
9	9	1	Terreno con vegetación forestal	220975.092	2797887.032
10	10	1	Terreno con vegetación forestal	223442.089	2798897.142
11	11	1	Terreno con vegetación forestal	224763.001	2801772.068
12	12	1	Terreno con vegetación forestal	228706.312	2800878.510
13	13	1	Terreno con vegetación forestal	231794.915	2805540.552
14	14	1	Terreno con vegetación forestal	236495.808	2805093.773
15	15	1	Terreno con vegetación forestal	232416.521	2799654.723
16	16	1	Terreno con vegetación forestal	238865.680	2801830.343
17	17	1	Terreno con vegetación forestal	237272.815	2798333.811
18	18	1	Terreno con vegetación forestal	233426.630	2796876.923
19	19	1	Terreno con vegetación forestal	233815.134	2793555.218
20	20	1	Terreno con vegetación forestal	228512.060	2792370.282
21	21	1	Terreno con vegetación forestal	226822.070	2793011.313
22	22	1	Terreno con vegetación forestal	225656.559	2790738.567
23	23	1	Terreno con vegetación forestal	221654.973	2789223.403
24	24	1	Terreno con vegetación forestal	218585.795	2782677.118
25	25	1	Terreno con vegetación forestal	217731.087	2777490.596
26	26	1	Terreno con vegetación forestal	233620.882	2777315.769
27	27	1	Terreno con vegetación forestal	238049.823	2774848.772
28	28	1	Terreno con vegetación forestal	245431.390	2772206.948
29	29	1	Terreno con vegetación forestal	239953.490	2771663.043
30	30	1	Terreno con vegetación forestal	237195.115	2767214.677
31	31	1	Terreno con vegetación forestal	245547.941	2763485.043
32	32	1	Terreno con vegetación forestal	240186.592	2762533.209
33	33	1	Terreno con vegetación forestal	240594.521	2758900.701
34	34	1	Terreno con vegetación forestal	248597.694	2760493.566
35	35	1	Terreno con vegetación forestal	213923.752	2757424.388
36	1	2	Terreno de cultivo	221895.621	2778034.280
37	2	2	Terreno de cultivo	221995.498	2776469.542
38	3	2	Terreno de cultivo	223493.652	2774705.050
39	4	2	Terreno de cultivo	222211.898	2772224.773
40	5	2	Terreno de cultivo	226789.590	2772291.358

41	6	2	Terreno de cultivo	228587.374	2775470.773
42	7	2	Terreno de cultivo	231350.635	2776985.573
43	8	2	Terreno de cultivo	233997.373	2773856.096
44	9	2	Terreno de cultivo	229735.959	2770127.358
45	10	2	Terreno de cultivo	225724.236	2770476.928
46	11	2	Terreno de cultivo	221229.775	2769428.220
47	12	2	Terreno de cultivo	221762.452	2767180.990
48	13	2	Terreno de cultivo	225690.944	2767197.636
49	14	2	Terreno de cultivo	228753.836	2768529.328
50	15	2	Terreno de cultivo	231983.189	2769444.866
51	16	2	Terreno de cultivo	234879.619	2764467.667
52	17	2	Terreno de cultivo	231583.681	2764201.329
53	18	2	Terreno de cultivo	233031.897	2759823.391
54	19	2	Terreno de cultivo	225358.021	2761121.791
55	20	2	Terreno de cultivo	219049.130	2759490.468
56	21	2	Terreno de cultivo	216935.068	2757542.868
57	22	2	Terreno de cultivo	215503.499	2755928.191
58	23	2	Terreno de cultivo	218583.037	2751100.808
59	24	2	Terreno de cultivo	215403.622	2744575.516
60	25	2	Terreno de cultivo	220297.591	2741962.070
61	26	2	Terreno de cultivo	220414.114	2739565.025
62	27	2	Terreno de cultivo	225491.190	2748021.270
63	28	2	Terreno de cultivo	226353.527	2755550.893
64	29	2	Terreno de cultivo	228468.101	2757462.468
65	30	2	Terreno de cultivo	228958.682	2747261.765
66	31	2	Terreno de cultivo	230379.675	2748547.426
67	32	2	Terreno de cultivo	230971.756	2750966.498
68	33	2	Terreno de cultivo	236063.648	2748547.426
69	34	2	Terreno de cultivo	240072.880	2748429.010
70	35	2	Terreno de cultivo	241307.790	2751457.079
71	1	3	Terreno sin vegetación	207914.447	2793477.882
72	2	3	Terreno sin vegetación	210993.266	2790128.398
73	3	3	Terreno sin vegetación	212786.424	2794560.543
74	4	3	Terreno sin vegetación	215526.911	2795287.957
75	5	3	Terreno sin vegetación	217692.235	2793647.048
76	6	3	Terreno sin vegetación	220517.305	2799144.939
77	7	3	Terreno sin vegetación	223054.793	2796336.785
78	8	3	Terreno sin vegetación	223680.706	2791617.057
79	9	3	Terreno sin vegetación	221210.885	2793156.467
80	10	3	Terreno sin vegetación	234676.488	2795947.704
81	11	3	Terreno sin vegetación	236774.145	2801225.679
82	12	3	Terreno sin vegetación	233949.075	2803137.253
83	13	3	Terreno sin vegetación	240445.044	2796641.284
84	14	3	Terreno sin vegetación	237315.476	2794289.878
85	15	3	Terreno sin vegetación	239819.131	2791752.390
86	16	3	Terreno sin vegetación	236317.397	2787793.909
87	17	3	Terreno sin vegetación	235065.570	2785256.420
88	18	3	Terreno sin vegetación	229906.011	2785154.921

89	19	3	Terreno sin vegetación	227588.438	2782685.099
90	20	3	Terreno sin vegetación	225152.450	2777677.789
91	21	3	Terreno sin vegetación	227723.771	2776527.461
92	22	3	Terreno sin vegetación	216744.906	2775867.715
93	23	3	Terreno sin vegetación	217438.486	2770014.575
94	24	3	Terreno sin vegetación	225135.533	2770149.908
95	25	3	Terreno sin vegetación	218301.232	2762994.192
96	26	3	Terreno sin vegetación	225507.698	2764855.016
97	27	3	Terreno sin vegetación	232849.497	2765413.264
98	28	3	Terreno sin vegetación	242542.701	2760219.871
99	29	3	Terreno sin vegetación	247262.429	2760084.539
100	30	3	Terreno sin vegetación	249732.251	2755043.396
101	31	3	Terreno sin vegetación	240174.379	2752996.489
102	32	3	Terreno sin vegetación	237856.807	2747414.015
103	33	3	Terreno sin vegetación	231073.255	2747363.265
104	34	3	Terreno sin vegetación	219096.311	2741324.043
105	35	3	Terreno sin vegetación	214731.832	2746906.517

Anexo 2.

Puntos de muestreo en la imagen del 1 de enero al 30 de mayo de 2022 en la subcuenca río pericos.

No.	Cantidad por clase	Clase	Descripción	UTM X	UTM Y
1	1	1	Terreno con vegetación forestal	208263.601	2791532.022
2	2	1	Terreno con vegetación forestal	210384.209	2789192.795
3	3	1	Terreno con vegetación forestal	211499.167	2791357.127
4	4	1	Terreno con vegetación forestal	214887.767	2792953.048
5	5	1	Terreno con vegetación forestal	211171.238	2797675.225
6	6	1	Terreno con vegetación forestal	213335.570	2797697.087
7	7	1	Terreno con vegetación forestal	218626.158	2795292.275
8	8	1	Terreno con vegetación forestal	217948.438	2799358.594
9	9	1	Terreno con vegetación forestal	220987.246	2797675.225
10	10	1	Terreno con vegetación forestal	223348.335	2798637.150
11	11	1	Terreno con vegetación forestal	224630.392	2801947.572
12	12	1	Terreno con vegetación forestal	229051.989	2800875.670
13	13	1	Terreno con vegetación forestal	232691.991	2799535.792
14	14	1	Terreno con vegetación forestal	232133.708	2805587.574
15	15	1	Terreno con vegetación forestal	236622.299	2804850.641
16	16	1	Terreno con vegetación forestal	237180.582	2798597.877
17	17	1	Terreno con vegetación forestal	233540.580	2796655.054
18	18	1	Terreno con vegetación forestal	234031.869	2793796.648
19	19	1	Terreno con vegetación forestal	228761.682	2792121.801
20	20	1	Terreno con vegetación forestal	226573.215	2793193.703
21	21	1	Terreno con vegetación forestal	225813.951	2790402.291
22	22	1	Terreno con vegetación forestal	221838.980	2788973.088
23	23	1	Terreno con vegetación forestal	218712.598	2782452.348
24	24	1	Terreno con vegetación forestal	217484.376	2777338.481

25	25	1	Terreno con vegetación forestal	233361.930	2777316.150
26	26	1	Terreno con vegetación forestal	238096.165	2774636.394
27	27	1	Terreno con vegetación forestal	245666.475	2772001.301
28	28	1	Terreno con vegetación forestal	239838.006	2771376.024
29	29	1	Terreno con vegetación forestal	236957.269	2767579.704
30	30	1	Terreno con vegetación forestal	245755.800	2763202.769
31	31	1	Terreno con vegetación forestal	240373.957	2762309.517
32	32	1	Terreno con vegetación forestal	240306.963	2759026.816
33	33	1	Terreno con vegetación forestal	248971.507	2760433.688
34	34	1	Terreno con vegetación forestal	213732.718	2757262.644
35	35	1	Terreno con vegetación forestal	239123.405	2801634.934
36	1	2	Terreno de cultivo	221838.980	2777785.107
37	2	2	Terreno de cultivo	223826.465	2774703.388
38	3	2	Terreno de cultivo	222486.587	2772202.282
39	4	2	Terreno de cultivo	231240.456	2776735.536
40	5	2	Terreno de cultivo	233987.206	2774279.093
41	6	2	Terreno de cultivo	231999.720	2769254.551
42	7	2	Terreno de cultivo	229587.940	2770371.116
43	8	2	Terreno de cultivo	226975.178	2772179.951
44	9	2	Terreno de cultivo	225746.957	2770817.742
45	10	2	Terreno de cultivo	229051.989	2768428.293
46	11	2	Terreno de cultivo	221191.372	2769857.496
47	12	2	Terreno de cultivo	222218.612	2766530.133
48	13	2	Terreno de cultivo	226037.264	2765167.923
49	14	2	Terreno de cultivo	225523.644	2767133.078
50	15	2	Terreno de cultivo	231620.088	2764453.322
51	16	2	Terreno de cultivo	225010.024	2760947.308
52	17	2	Terreno de cultivo	219293.212	2759808.412
53	18	2	Terreno de cultivo	217283.395	2757307.306
54	19	2	Terreno de cultivo	215921.185	2755900.434
55	20	2	Terreno de cultivo	227600.455	2756079.085
56	21	2	Terreno de cultivo	219203.886	2750719.573
57	22	2	Terreno de cultivo	215072.596	2746387.301
58	23	2	Terreno de cultivo	209958.729	2751121.537
59	24	2	Terreno de cultivo	216501.799	2744355.153
60	25	2	Terreno de cultivo	220834.071	2741898.710
61	26	2	Terreno de cultivo	219002.905	2740782.145
62	27	2	Terreno de cultivo	220767.077	2739665.580
63	28	2	Terreno de cultivo	225300.331	2748240.799
64	29	2	Terreno de cultivo	229386.958	2747146.565
65	30	2	Terreno de cultivo	230481.192	2749647.671
66	31	2	Terreno de cultivo	231151.131	2750786.567
67	32	2	Terreno de cultivo	228650.026	2757910.251
68	33	2	Terreno de cultivo	237247.576	2748397.118
69	34	2	Terreno de cultivo	240842.915	2749044.726
70	35	2	Terreno de cultivo	241356.534	2751188.530
71	1	3	Terreno sin vegetación	207834.865	2793271.309
72	2	3	Terreno sin vegetación	211118.595	2789626.541

73	3	3	Terreno sin vegetación	212940.979	2794337.232
74	4	3	Terreno sin vegetación	215898.055	2795265.616
75	5	3	Terreno sin vegetación	217840.785	2793529.194
76	6	3	Terreno sin vegetación	221038.554	2793494.809
77	7	3	Terreno sin vegetación	223703.360	2791844.348
78	8	3	Terreno sin vegetación	223325.130	2796383.116
79	9	3	Terreno sin vegetación	234792.396	2795609.463
80	10	3	Terreno sin vegetación	237113.356	2794337.232
81	11	3	Terreno sin vegetación	240070.433	2791861.541
82	12	3	Terreno sin vegetación	240620.586	2796383.116
83	13	3	Terreno sin vegetación	236528.818	2787752.580
84	14	3	Terreno sin vegetación	234826.780	2785208.119
85	15	3	Terreno sin vegetación	230184.859	2785156.543
86	16	3	Terreno sin vegetación	227451.282	2782921.543
87	17	3	Terreno sin vegetación	224941.206	2777505.968
88	18	3	Terreno sin vegetación	227640.398	2776818.276
89	19	3	Terreno sin vegetación	216499.786	2775786.738
90	20	3	Terreno sin vegetación	221846.592	2776268.122
91	21	3	Terreno sin vegetación	217617.285	2769838.201
92	22	3	Terreno sin vegetación	218580.054	2762909.703
93	23	3	Terreno sin vegetación	224614.552	2761396.780
94	24	3	Terreno sin vegetación	233141.935	2765540.125
95	25	3	Terreno sin vegetación	242133.509	2760382.435
96	26	3	Terreno sin vegetación	247480.315	2760244.896
97	27	3	Terreno sin vegetación	238196.472	2747488.208
98	28	3	Terreno sin vegetación	249766.891	2755327.898
99	29	3	Terreno sin vegetación	231646.204	2747178.746
100	30	3	Terreno sin vegetación	229497.166	2752181.706
101	31	3	Terreno sin vegetación	218837.939	2755585.782
102	32	3	Terreno sin vegetación	209932.326	2753591.475
103	33	3	Terreno sin vegetación	208694.480	2749671.630
104	34	3	Terreno sin vegetación	207370.673	2754382.321
105	35	3	Terreno sin vegetación	244540.431	2761671.857

Anexo 3. Fechas de imágenes satelitales, para las fechas del 1 de enero del 2019 al 30 de mayo del 2019.

ID	IMAGEN SATELITAL	FECHA DE IMAGEN
1	0: Image COPERNICUS/S2_SR/20190104T174729_20190104T174726_T12RZP (23 bands)	04/01/2019
2	1: Image COPERNICUS/S2_SR/20190104T174729_20190104T174726_T13RBJ (23 bands)	04/01/2019
3	2: Image COPERNICUS/S2_SR/20190109T174711_20190109T175144_T12RZN (23 bands)	09/01/2019
4	3: Image COPERNICUS/S2_SR/20190109T174711_20190109T175144_T12RZP (23 bands)	09/01/2019
5	4: Image COPERNICUS/S2_SR/20190109T174711_20190109T175144_T13RBH (23 bands)	09/01/2019
6	5: Image COPERNICUS/S2_SR/20190109T174711_20190109T175144_T13RBJ (23 bands)	09/01/2019

7	6: Image COPERNICUS/S2_SR/20190119T174641_20190119T174954_T12RZN (23 bands)	19/01/2019
8	7: Image COPERNICUS/S2_SR/20190119T174641_20190119T174954_T12RZP (23 bands)	19/01/2019
9	8: Image COPERNICUS/S2_SR/20190119T174641_20190119T174954_T13RBH (23 bands)	19/01/2019
10	9: Image COPERNICUS/S2_SR/20190119T174641_20190119T174954_T13RBJ (23 bands)	19/01/2019
11	10: Image COPERNICUS/S2_SR/20190124T174629_20190124T175606_T12RZN (23 bands)	24/01/2019
12	11: Image COPERNICUS/S2_SR/20190124T174629_20190124T175606_T12RZP (23 bands)	24/01/2019
13	12: Image COPERNICUS/S2_SR/20190124T174629_20190124T175606_T13RBH (23 bands)	24/01/2019
14	13: Image COPERNICUS/S2_SR/20190124T174629_20190124T175606_T13RBJ (23 bands)	24/01/2019
15	14: Image COPERNICUS/S2_SR/20190129T174601_20190129T174743_T13RBJ (23 bands)	29/01/2019
16	15: Image COPERNICUS/S2_SR/20190203T174539_20190203T175226_T12RZN (23 bands)	03/02/2019
17	16: Image COPERNICUS/S2_SR/20190203T174539_20190203T175226_T12RZP (23 bands)	03/02/2019
18	17: Image COPERNICUS/S2_SR/20190203T174539_20190203T175226_T13RBH (23 bands)	03/02/2019
19	18: Image COPERNICUS/S2_SR/20190203T174539_20190203T175226_T13RBJ (23 bands)	03/02/2019
20	19: Image COPERNICUS/S2_SR/20190208T174501_20190208T174525_T12RZP (23 bands)	08/02/2019
21	20: Image COPERNICUS/S2_SR/20190208T174501_20190208T174525_T13RBJ (23 bands)	08/02/2019
22	21: Image COPERNICUS/S2_SR/20190213T174439_20190213T175505_T12RZN (23 bands)	13/02/2019
23	22: Image COPERNICUS/S2_SR/20190213T174439_20190213T175505_T12RZP (23 bands)	13/02/2019
24	23: Image COPERNICUS/S2_SR/20190213T174439_20190213T175505_T13RBH (23 bands)	13/02/2019
25	24: Image COPERNICUS/S2_SR/20190213T174439_20190213T175505_T13RBJ (23 bands)	13/02/2019
26	25: Image COPERNICUS/S2_SR/20190218T174401_20190218T175534_T12RZP (23 bands)	18/02/2019
27	26: Image COPERNICUS/S2_SR/20190218T174401_20190218T175534_T13RBJ (23 bands)	18/02/2019
28	27: Image COPERNICUS/S2_SR/20190228T174251_20190228T175323_T12RZN (23 bands)	28/02/2019
29	28: Image COPERNICUS/S2_SR/20190228T174251_20190228T175323_T12RZP (23 bands)	28/02/2019
30	29: Image COPERNICUS/S2_SR/20190228T174251_20190228T175323_T13RBH (23 bands)	28/02/2019
31	30: Image COPERNICUS/S2_SR/20190228T174251_20190228T175323_T13RBJ (23 bands)	28/02/2019
32	31: Image COPERNICUS/S2_SR/20190305T174219_20190305T175513_T12RZN (23 bands)	05/03/2019
33	32: Image COPERNICUS/S2_SR/20190305T174219_20190305T175513_T13RBH (23 bands)	05/03/2019
34	33: Image COPERNICUS/S2_SR/20190310T174141_20190310T175052_T12RZN (23 bands)	10/03/2019
35	34: Image COPERNICUS/S2_SR/20190310T174141_20190310T175052_T13RBH (23 bands)	10/03/2019
36	35: Image COPERNICUS/S2_SR/20190320T174031_20190320T175220_T12RZN (23 bands)	20/03/2019
37	36: Image COPERNICUS/S2_SR/20190320T174031_20190320T175220_T12RZP (23 bands)	20/03/2019
38	37: Image COPERNICUS/S2_SR/20190320T174031_20190320T175220_T13RBH (23 bands)	20/03/2019
39	38: Image COPERNICUS/S2_SR/20190320T174031_20190320T175220_T13RBJ (23 bands)	20/03/2019
40	39: Image COPERNICUS/S2_SR/20190325T173959_20190325T175542_T12RZN (23 bands)	25/03/2019
41	40: Image COPERNICUS/S2_SR/20190325T173959_20190325T175542_T12RZP (23 bands)	25/03/2019
42	41: Image COPERNICUS/S2_SR/20190325T173959_20190325T175542_T13RBH (23 bands)	25/03/2019
43	42: Image COPERNICUS/S2_SR/20190325T173959_20190325T175542_T13RBJ (23 bands)	25/03/2019
44	43: Image COPERNICUS/S2_SR/20190404T173909_20190404T174550_T12RZN (23 bands)	04/04/2019
45	44: Image COPERNICUS/S2_SR/20190404T173909_20190404T174550_T12RZP (23 bands)	04/04/2019
46	45: Image COPERNICUS/S2_SR/20190404T173909_20190404T174550_T13RBH (23 bands)	04/04/2019
47	46: Image COPERNICUS/S2_SR/20190404T173909_20190404T174550_T13RBJ (23 bands)	04/04/2019

48	47: Image COPERNICUS/S2_SR/20190409T173911_20190409T175027_T12RZN (23 bands)	09/04/2019
49	48: Image COPERNICUS/S2_SR/20190409T173911_20190409T175027_T12RZP (23 bands)	09/04/2019
50	49: Image COPERNICUS/S2_SR/20190409T173911_20190409T175027_T13RBH (23 bands)	09/04/2019
51	50: Image COPERNICUS/S2_SR/20190409T173911_20190409T175027_T13RBJ (23 bands)	09/04/2019
52	51: Image COPERNICUS/S2_SR/20190414T173909_20190414T174559_T12RZN (23 bands)	14/04/2019
53	52: Image COPERNICUS/S2_SR/20190414T173909_20190414T174559_T12RZP (23 bands)	14/04/2019
54	53: Image COPERNICUS/S2_SR/20190414T173909_20190414T174559_T13RBH (23 bands)	14/04/2019
55	54: Image COPERNICUS/S2_SR/20190414T173909_20190414T174559_T13RBJ (23 bands)	14/04/2019
56	55: Image COPERNICUS/S2_SR/20190419T173911_20190419T175636_T12RZN (23 bands)	19/04/2019
57	56: Image COPERNICUS/S2_SR/20190419T173911_20190419T175636_T12RZP (23 bands)	19/04/2019
58	57: Image COPERNICUS/S2_SR/20190419T173911_20190419T175636_T13RBH (23 bands)	19/04/2019
59	58: Image COPERNICUS/S2_SR/20190419T173911_20190419T175636_T13RBJ (23 bands)	19/04/2019
60	59: Image COPERNICUS/S2_SR/20190424T173909_20190424T175003_T12RZN (23 bands)	24/04/2019
61	60: Image COPERNICUS/S2_SR/20190424T173909_20190424T175003_T12RZP (23 bands)	24/04/2019
62	61: Image COPERNICUS/S2_SR/20190424T173909_20190424T175003_T13RBH (23 bands)	24/04/2019
63	62: Image COPERNICUS/S2_SR/20190424T173909_20190424T175003_T13RBJ (23 bands)	24/04/2019
64	63: Image COPERNICUS/S2_SR/20190429T173911_20190429T175326_T12RZN (23 bands)	29/04/2019
65	64: Image COPERNICUS/S2_SR/20190429T173911_20190429T175326_T13RBH (23 bands)	29/04/2019
66	65: Image COPERNICUS/S2_SR/20190504T173909_20190504T175131_T12RZN (23 bands)	04/05/2019
67	66: Image COPERNICUS/S2_SR/20190504T173909_20190504T175131_T12RZP (23 bands)	04/05/2019
68	67: Image COPERNICUS/S2_SR/20190504T173909_20190504T175131_T13RBH (23 bands)	04/05/2019
69	68: Image COPERNICUS/S2_SR/20190504T173909_20190504T175131_T13RBJ (23 bands)	04/05/2019
70	69: Image COPERNICUS/S2_SR/20190509T173911_20190509T175022_T12RZN (23 bands)	09/05/2019
71	70: Image COPERNICUS/S2_SR/20190509T173911_20190509T175022_T12RZP (23 bands)	09/05/2019
72	71: Image COPERNICUS/S2_SR/20190509T173911_20190509T175022_T13RBH (23 bands)	09/05/2019
73	72: Image COPERNICUS/S2_SR/20190509T173911_20190509T175022_T13RBJ (23 bands)	09/05/2019
74	73: Image COPERNICUS/S2_SR/20190514T173909_20190514T174602_T12RZN (23 bands)	14/05/2019
75	74: Image COPERNICUS/S2_SR/20190514T173909_20190514T174602_T12RZP (23 bands)	14/05/2019
76	75: Image COPERNICUS/S2_SR/20190514T173909_20190514T174602_T13RBH (23 bands)	14/05/2019
77	76: Image COPERNICUS/S2_SR/20190514T173909_20190514T174602_T13RBJ (23 bands)	14/05/2019
78	77: Image COPERNICUS/S2_SR/20190519T173911_20190519T174841_T12RZN (23 bands)	19/05/2019
79	78: Image COPERNICUS/S2_SR/20190519T173911_20190519T174841_T12RZP (23 bands)	19/05/2019
80	79: Image COPERNICUS/S2_SR/20190519T173911_20190519T174841_T13RBH (23 bands)	19/05/2019
81	80: Image COPERNICUS/S2_SR/20190519T173911_20190519T174841_T13RBJ (23 bands)	19/05/2019
82	81: Image COPERNICUS/S2_SR/20190524T173909_20190524T175456_T12RZN (23 bands)	24/05/2019
83	82: Image COPERNICUS/S2_SR/20190524T173909_20190524T175456_T12RZP (23 bands)	24/05/2019
84	83: Image COPERNICUS/S2_SR/20190524T173909_20190524T175456_T13RBH (23 bands)	24/05/2019
85	84: Image COPERNICUS/S2_SR/20190524T173909_20190524T175456_T13RBJ (23 bands)	24/05/2019
86	85: Image COPERNICUS/S2_SR/20190529T173911_20190529T175426_T12RZN (23 bands)	29/05/2019
87	86: Image COPERNICUS/S2_SR/20190529T173911_20190529T175426_T12RZP (23 bands)	29/05/2019
88	87: Image COPERNICUS/S2_SR/20190529T173911_20190529T175426_T13RBH (23 bands)	29/05/2019

Anexo 4. Fechas de imágenes satelitales, para las fechas del 1 de enero del 2022 al 30 de mayo del 2022.

ID	IMÁGENES SATELITALES 2022	FECHA DE IMAGEN
1	0: Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220103T174731_20220103T175119_T12RZN (23 bandas)	03/01/2022
2	1 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220103T174731_20220103T175119_T12RZP (23 bandas)	03/01/2022
3	2 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220103T174731_20220103T175119_T13RBH (23 bandas)	03/01/2022
4	3 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220103T174731_20220103T175119_T13RBJ (23 bandas)	03/01/2022
5	4 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220108T174719_20220108T175422_T12RZN (23 bandas)	08/01/2022
6	5 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220108T174719_20220108T175422_T12RZP (23 bandas)	08/01/2022
7	6 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220108T174719_20220108T175422_T13RBH (23 bandas)	08/01/2022
8	7 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220108T174719_20220108T175422_T13RBJ (23 bandas)	08/01/2022
9	8 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220113T174711_20220113T175025_T12RZN (23 bandas)	13/01/2022
10	9 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220113T174711_20220113T175025_T12RZP (23 bandas)	13/01/2022
11	10 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220113T174711_20220113T175025_T13RBH (23 bandas)	13/01/2022
12	11 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220113T174711_20220113T175025_T13RBJ (23 bandas)	13/01/2022
13	12 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220128T174559_20220128T174952_T12RZP (23 bandas)	28/01/2022
14	13 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220128T174559_20220128T174952_T13RBJ (23 bandas)	28/01/2022
15	14 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220207T174509_20220207T175018_T12RZN (23 bandas)	07/02/2022
16	15 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220207T174509_20220207T175018_T12RZP (23 bandas)	07/02/2022
17	16 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220207T174509_20220207T175018_T13RBH (23 bandas)	07/02/2022
18	17 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220207T174509_20220207T175018_T13RBJ (23 bandas)	07/02/2022
19	18 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220212T174441_20220212T175422_T12RZP (23 bandas)	12/02/2022
20	19 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220212T174441_20220212T175422_T13RBJ (23 bandas)	12/02/2022
21	20 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220217T174359_20220217T174938_T12RZN (23 bandas)	17/02/2022
22	21 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220217T174359_20220217T174938_T12RZP (23 bandas)	17/02/2022
23	22 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220217T174359_20220217T174938_T13RBH (23 bandas)	17/02/2022
24	23 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220217T174359_20220217T174938_T13RBJ (23 bandas)	17/02/2022
25	24 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220222T174341_20220222T174936_T12RZN (23 bandas)	22/02/2022
26	25 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220222T174341_20220222T174936_T12RZP (23 bandas)	22/02/2022
27	26 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220222T174341_20220222T174936_T13RBH (23 bandas)	22/02/2022
28	27 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220222T174341_20220222T174936_T13RBJ (23 bandas)	22/02/2022
29	28 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220227T174249_20220227T175407_T12RZN (23 bandas)	27/02/2022
30	29 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220227T174249_20220227T175407_T12RZP (23 bandas)	27/02/2022
31	30 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220227T174249_20220227T175407_T13RBH (23 bandas)	27/02/2022
32	31 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220227T174249_20220227T175407_T13RBJ (23 bandas)	27/02/2022
33	32 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220304T174231_20220304T175542_T12RZN (23 bandas)	04/03/2022

34	33 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220304T174231_20220304T175542_T12RZP (23 bandas)	04/03/2022
35	34 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220304T174231_20220304T175542_T13RBH (23 bandas)	04/03/2022
36	35 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220304T174231_20220304T175542_T13RBJ (23 bandas)	04/03/2022
37	36 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220309T174049_20220309T175423_T12RZN (23 bandas)	09/03/2022
38	37 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220309T174049_20220309T175423_T12RZP (23 bandas)	09/03/2022
39	38 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220309T174049_20220309T175423_T13RBH (23 bandas)	09/03/2022
40	39 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220309T174049_20220309T175423_T13RBJ (23 bandas)	09/03/2022
41	40 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220314T174111_20220314T175050_T12RZP (23 bandas)	14/03/2022
42	41 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220314T174111_20220314T175050_T13RBJ (23 bandas)	14/03/2022
43	42 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220319T173939_20220319T175000_T12RZN (23 bandas)	19/03/2022
44	43 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220319T173939_20220319T175000_T12RZP (23 bandas)	19/03/2022
45	44 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220319T173939_20220319T175000_T13RBH (23 bandas)	19/03/2022
46	45 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220319T173939_20220319T175000_T13RBJ (23 bandas)	19/03/2022
47	46 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220324T174001_20220324T175453_T12RZN (23 bandas)	24/03/2022
48	47 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220324T174001_20220324T175453_T12RZP (23 bandas)	24/03/2022
49	48 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220324T174001_20220324T175453_T13RBH (23 bandas)	24/03/2022
50	49 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220324T174001_20220324T175453_T13RBJ (23 bandas)	24/03/2022
51	50 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220329T173859_20220329T175246_T12RZN (23 bandas)	29/03/2022
52	51 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220329T173859_20220329T175246_T12RZP (23 bandas)	29/03/2022
53	52 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220329T173859_20220329T175246_T13RBH (23 bandas)	29/03/2022
54	53 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220329T173859_20220329T175246_T13RBJ (23 bandas)	29/03/2022
55	54 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220403T173911_20220403T175638_T12RZN (23 bandas)	03/04/2022
56	55 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220403T173911_20220403T175638_T12RZP (23 bandas)	03/04/2022
57	56 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220403T173911_20220403T175638_T13RBH (23 bandas)	03/04/2022
58	57 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220403T173911_20220403T175638_T13RBJ (23 bandas)	03/04/2022
59	58 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220408T173859_20220408T175347_T12RZP (23 bandas)	08/04/2022
60	59 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220408T173859_20220408T175347_T13RBJ (23 bandas)	08/04/2022
61	60 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220413T173911_20220413T174923_T12RZN (23 bandas)	13/04/2022
62	61 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220413T173911_20220413T174923_T12RZP (23 bandas)	13/04/2022
63	62 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220413T173911_20220413T174923_T13RBH (23 bandas)	13/04/2022
64	63 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220413T173911_20220413T174923_T13RBJ (23 bandas)	13/04/2022
65	64 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220418T173859_20220418T175447_T12RZN (23 bandas)	18/04/2022
66	65 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220418T173859_20220418T175447_T12RZP (23 bandas)	18/04/2022
67	66 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220418T173859_20220418T175447_T13RBH (23 bandas)	18/04/2022
68	67 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220418T173859_20220418T175447_T13RBJ (23 bandas)	18/04/2022
69	68 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220423T173911_20220423T175102_T12RZN (23 bandas)	23/04/2022
70	69 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220423T173911_20220423T175102_T12RZP (23 bandas)	23/04/2022
71	70 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220423T173911_20220423T175102_T13RBH (23 bandas)	23/04/2022
72	71 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220423T173911_20220423T175102_T13RBJ (23 bandas)	23/04/2022
73	72 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220428T173859_20220428T175538_T12RZN (23 bandas)	28/04/2022
74	73 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220428T173859_20220428T175538_T12RZP (23 bandas)	28/04/2022

75	74 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220428T173859_20220428T175538_T13RBH (23 bandas)	28/04/2022
76	75 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220428T173859_20220428T175538_T13RBJ (23 bandas)	28/04/2022
77	76 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220503T173911_20220503T175106_T12RZN (23 bandas)	03/05/2022
78	77 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220503T173911_20220503T175106_T12RZP (23 bandas)	03/05/2022
79	78 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220503T173911_20220503T175106_T13RBH (23 bandas)	03/05/2022
80	79 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220503T173911_20220503T175106_T13RBJ (23 bandas)	03/05/2022
81	80 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220508T173859_20220508T175626_T12RZN (23 bandas)	08/05/2022
82	81 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220508T173859_20220508T175626_T12RZP (23 bandas)	08/05/2022
83	82 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220508T173859_20220508T175626_T13RBH (23 bandas)	08/05/2022
84	83 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220508T173859_20220508T175626_T13RBJ (23 bandas)	08/05/2022
85	84 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220513T173911_20220513T174428_T12RZN (23 bandas)	13/05/2022
86	85 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220513T173911_20220513T174428_T12RZP (23 bandas)	13/05/2022
87	86 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220513T173911_20220513T174428_T13RBH (23 bandas)	13/05/2022
88	87 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220513T173911_20220513T174428_T13RBJ (23 bandas)	13/05/2022
89	88 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220513T173911_20220513T175709_T12RZN (23 bandas)	13/05/2022
90	89 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220513T173911_20220513T175709_T13RBH (23 bandas)	13/05/2022
91	90 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220518T173859_20220518T175502_T12RZN (23 bandas)	18/05/2022
92	91 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220518T173859_20220518T175502_T12RZP (23 bandas)	18/05/2022
93	92 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220518T173859_20220518T175502_T13RBH (23 bandas)	18/05/2022
94	93 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220518T173859_20220518T175502_T13RBJ (23 bandas)	18/05/2022
95	94 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220523T173911_20220523T174435_T12RZN (23 bandas)	23/05/2022
96	95 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220523T173911_20220523T174435_T12RZP (23 bandas)	23/05/2022
97	96 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220523T173911_20220523T174435_T13RBH (23 bandas)	23/05/2022
98	97 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220523T173911_20220523T174435_T13RBJ (23 bandas)	23/05/2022
99	98 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220523T173911_20220523T175716_T12RZN (23 bandas)	23/05/2022
100	99 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220523T173911_20220523T175716_T13RBH (23 bandas)	23/05/2022
101	100 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220528T173909_20220528T174833_T12RZN (23 bandas)	28/05/2022
102	101 :Imagen COPERNICUS/S2_SR/20220528T173909_20220528T174833_T12RZP (23 bandas)	28/05/2022
103	102: Image COPERNICUS/S2_SR/20220528T173909_20220528T174833_T13RBH (23 bands)	28/05/2022
104	103: Image COPERNICUS/S2_SR/20220528T173909_20220528T174833_T13RBJ (23 bands)	28/05/2022