

**Estudio multitemporal de la variación del Índice de Vegetación de Diferencia
Normalizado NDVI en el Territorio Indígena Multiétnico TIM desde 2016 hasta 2020**

Preparado por:

Mario E. Cerezo Calderón, ORE

Agosto, 2023.

I. INTRODUCCIÓN

Los bosques amazónicos y los bosques del sureste boliviano representan un espacio selvático de magnitud que aportan a la estabilidad del clima y el balance de la humedad de todo el planeta. La amazonia contiene una gran riqueza biológica y el mayor sistema micrográfico del mundo, y la región boliviana, que representa apenas un 1.27% de toda la amazonia, se caracteriza por su buen estado de conservación (Urioste, 2010).

En la región sur de la amazonía boliviana, se encuentra justamente el Territorio Indígena Multiétnico TIM, que está ubicado en el departamento de Beni, la mayor parte de su territorio de más de 600.000 hectáreas contiene a bosques inundables amazónicos y la región sur del TIM está conformado por bosques de pie de monte y de yungas amazónico, este territorio fue constituido sobre ex concesiones forestales de la época de los 90s que extrajeron mayormente árboles de mara entre otras 14 especies de alto valor comercial (ORE Organización de Apoyo Legal y Social, 2022), dejando un bosque seriamente intervenido que actualmente se encuentra en proceso de recuperación.

Mientras que la región central y este del territorio del TIM presenta mayor intervención por cambio de uso de suelos de parte de comunidades o privados, donde se observa una ampliación progresiva de los pastizales naturales y/o sembrados sobre los bosques circundantes con el fin de ser utilizados en ganadería y en menor proporción en agricultura.

Estos ecosistemas modificados en que el bosque es progresivamente remplazado por pastizales o chacos, pueden disminuir la capacidad de retención de humedad en el ambiente y ponen en manifiesto mayor estrés en la vegetación, de hecho, se espera que pérdidas mayores del bosque amazónico, incluso tengan efectos significativos para las actividades agrícolas de las que depende mayor parte de la agricultura en región sur de Sudamérica, afectando también la llegada de las lluvias en esa parte del continente, además de una pérdida irreversible de la biodiversidad asociada (MMAyA & APMT, 2022), además la capacidad de adaptación autónoma del ecosistema depende mucho de su estado y de las otras presiones no climáticas. Por ejemplo, la degradación o la fragmentación de un bosque por presiones humanas reduce su resiliencia al cambio climático, como en el caso de los bosques altamente fragmentados en zonas urbanas o agrícolas y los parches de bosques aislados (Locatelli, 2006).

Adicionalmente, la capacidad de actividad fotosintética que libera mayor oxígeno al ambiente y captura mayor dióxido de carbono, se hace presente en masas boscosas grandes y no fragmentadas que en ecosistemas de vegetación estacional y no boscosa, ésta pérdida de mayor capacidad de secuestro de carbono también deviene en la pérdida de plantas y animales (Gobierno Autónomo Departamental de Santa Cruz, 2009).

En el Territorio Indígena Multiétnico TIM no se han realizado hasta el momento estudios territorializados sobre el estrés de la vegetación y la dimensión de la actividad fotosintética en los distintos tipos de vegetación presentes, siendo éste un insumo importante para priorizar estrategias de conservación de áreas importantes para el territorio y para realizar un manejo sostenible del bosque sin poner en riesgo la garantía de contar con un bosque sano para las próximas generaciones de los pueblos indígenas del TIM.

Las imágenes satelitales de Planet Scope NICFI, permiten un análisis de alta resolución para la detección del estrés en la vegetación dado que nos permiten acceder a mosaicos de imágenes satelitales que tienen una resolución espacial de 4,7mts, estos mosaicos ofrecen una representación analítica o de "verdad sobre el terreno" de datos espacialmente precisos con efectos minimizados de la atmósfera y las características del sensor. Incluyen una cuarta banda (infrarrojo cercano) y son adecuados para una variedad de índices de vegetación, incluido el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) (Planet et al., 2021).

En el siguiente reporte de monitoreo, se utilizó las imágenes normalizadas bianuales de Planet Scope disponibles para los años 2016 al 2020, a fin de comparar la variación estacional del índice de vegetación de diferencia normalizado NDVI en el Territorio Indígena Multiétnico TIM, identificar el rango de esta variación y cuales son las regiones que presentan mayor estrés en la vegetación o mayor actividad fotosintética que se traduce en mayor captura de carbono, para finalmente obtener el Índice de Agua de Diferencia Normalizado NDWI del último periodo de estudio para comparar datos de referencia.

II. OBJETIVOS

2.1.Objetivo General

Determinar la variación multitemporal bianual del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado en el Territorio Indígena Multiétnico TIM, en el periodo 2016 a 2020 con el uso de imágenes Planet Scope de NICFI.

2.2.Objetivos específicos

- Calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado NDVI para cada periodo bianual entre 2016 y 2020
- Localizar las regiones donde la actividad fotosintética detectada con el índice NDVI es mayor en el territorio TIM.
- Determinar si existen tendencias de disminución o incremento de superficies en base a rangos de NDVI determinados.
- Determinar si existe relación con datos del índice NDWI.

III. CONCEPTOS CLAVE

3.1.Características de las Imágenes satelitales Planet Scope

Las imágenes satelitales Planet Scope son provistas por el programa satelital Norway's International Climate and Forests Initiative (NICFI), que es un fondo de desarrollo internacional a través del cual Noruega se ha comprometido a aportar 3000 millones de NOK al año para ayudar a salvar los bosques tropicales del mundo y mejorar, al mismo tiempo, los medios de vida de quienes viven en los bosques o cerca de ellos ((Planet et al., 2021).

Estas imágenes están disponibles para descarga a través de la plataforma de Planet Explorer y/o sus pluggins de acceso directo en QGIS o ArcGIS que son programas computacionales para el manejo de Sistemas de Información Geográfica.

Las imágenes satelitales están agrupadas en mosaicos denominados “quads” que tienen una resolución espacial de 4,7mts por pixel, constan de datos espacialmente precisos con efectos minimizados de bruma, iluminación y topografía, tanto para un análisis visual gracias a sus tres bandas de color real (RGB), como para un análisis científico y cuantitativo gracias a una

cuarta banda de detección del infrarrojo cercano (adecuados para una variedad de detección de índices de vegetación).

La resolución temporal abarca a un archivo de imágenes satelitales con frecuencia semestral desde 2015 hasta 2020, y de una frecuencia mensual desde 2020 hasta la fecha.

3.2.El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado NDVI.

El Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) puede ser usado como un estimador de la fenología y un indicador del comportamiento estacional de la vegetación. Los valores del NDVI varían de -1 y 1, donde los valores cercanos a -1 indican poca actividad fotosintética y por ende poco crecimiento o reducción de la vegetación, en tanto que, los valores cercanos a 1 reflejan una alta actividad fotosintética (Maillard et al., 2019).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un indicador del vigor y la salud de la vegetación terrestre; es en otras palabras un índice de verdor de la planta o de actividad fotosintética (Cerezo Calderón, 2019), mismo que puede ser utilizado para determinar cuantitativamente cual es el estado de la salud de la vegetación en un ecosistema sea de bosque amazónico o de pampas arboladas.

Par su cálculo se requiere del uso de las bandas rojo e infrarrojo cercano, que corresponden a las bandas B3 y B4 de las imágenes satelitales de Planet Scope, aplicando la siguiente fórmula:

$$NDVI_{(planet\ scope)} = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} = \frac{(B4 - B3)}{(B4 + B3)}$$

Donde:

NIR= reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

R = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo

3.3.Índice de Agua de Diferencia Normalizada NDWI

El Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) se utiliza para resaltar el aspecto de las masas de agua en una imagen de satélite. Para ello, se reduce considerablemente la

reflectancia del suelo y la vegetación, lo que permite que dichas masas de agua “destaquen” en la imagen.

Par su cálculo se requiere del uso de las bandas verde e infrarrojo cercano, que corresponden a las bandas B2 y B4 de las imágenes satelitales de Planet Scope, aplicando la siguiente fórmula:

$$NDVI_{(planet\ scope)} = \frac{(NIR - G)}{(NIR + G)} = \frac{(B4 - B2)}{(B4 + B2)}$$

Donde:

NIR= reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

G = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al verde

Las longitudes de onda del verde visible maximizan la reflectancia habitual de la superficie del agua. Las longitudes de onda del infrarrojo cercano maximizan la alta reflectancia de la vegetación terrestre y las zonas de suelo, mientras que minimizan la baja reflectancia de las masas de agua.

El resultado de la fórmula NDWI son valores positivos para los elementos de agua y negativos (o cero) para el suelo y la vegetación terrestre

IV. METODOLOGÍA

4.1. Selección del área de estudio

El área de estudio corresponde a los límites jurisdiccionales del Territorio Indígena Multiétnico TIM, que se encuentra en el departamento de Beni, Bolivia.

A fin de cubrir todo el territorio se ha requerido la descarga de 35 mosaicos (quads) de las imágenes de Planet Scope para el análisis.

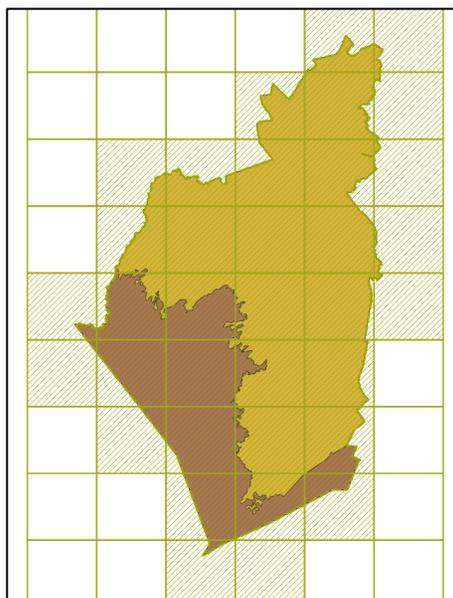


Ilustración 1: Quads de Planet Scope para la obtención de imágenes satelitales para el TIM

4.2. Obtención de las imágenes normalizadas bianuales entre 2016 y 2020.

Las imágenes fueron obtenidas mediante QGIS a través del plugin de Planet Explorer, en base al siguiente detalle:

Tabla 1: Catálogo de imágenes satelitales para descarga

Catálogo Basemaps disponible de Planet Scope	Periodo
planet_medres_normalized_analytic_2015-12_2016-05_mosaic	2016_1
planet_medres_normalized_analytic_2016-06_2016-11_mosaic	2016_2
planet_medres_normalized_analytic_2016-12_2017-05_mosaic	2017_1
planet_medres_normalized_analytic_2017-06_2017-11_mosaic	2017_2
planet_medres_normalized_analytic_2017-12_2018-05_mosaic	2018_1

planet_medres_normalized_analytic_2018-06_2018-11_mosaic	2018_2
planet_medres_normalized_analytic_2018-12_2019-05_mosaic	2019_1
planet_medres_normalized_analytic_2019-06_2019-11_mosaic	2019_2
planet_medres_normalized_analytic_2019-12_2020-05_mosaic	2020_1
planet_medres_normalized_analytic_2020-06_2020-08_mosaic	2020_2

**Las imágenes ya cuentan con la corrección atmosférica correspondiente.*

4.3.Cálculo del Índice NDVI por periodos

Se realizó el cálculo del NDVI mediante el uso de imágenes satelitales PlanetScope, de los periodos bianuales entre 2016 y 2020.

Para realizar el cálculo se utilizó la herramienta Raster Calculator. Los valores de NDVI se calcularon mediante la siguiente ecuación (2) para cada una de las imágenes.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2)$$

Donde:

NDVI= Índice diferencial de vegetación normalizada

NIR= Infrarrojo cercano

R= Rojo

Las bandas utilizadas para las imágenes de PlanetScope fueron la banda 4 (NIR) y la banda 3 (R).

Los resultados obtenidos al aplicar el índice NDVI, fueron clasificados con los valores propuestos por Merg et al., (2011) y ajustados en base a los rangos previsualizados en el área de estudio, los cuales corresponden a:

Tabla 2: Rangos de ajuste de valores NDVI

Descripción	Rango
Nubes y agua (NA)	< 0.2
Suelo sin vegetación o escasa (SV)	0.2 – 0.6
Vegetación ligera (VL)	0.6 – 0.7

Vegetación media (VM)	0.7– 0.8
Vegetación alta (VA)	> 0.8

Fuente: Merg et al. (2011) ajustado.

Para el presente reporte, los rangos de variación del NDVI fueron agrupados según el valor por pixel y se realizó un cálculo de superficie para cada rango de variación NDVI establecido.

4.4. Cálculo estadístico de la variación del Índice NDVI entre 2016 y 2020

Una vez obtenido el Índice NDVI clasificado según los rangos propuestos se procedió al cálculo de superficie en hectáreas para cada rango y para cada periodo de estudio.

Se calculó la variación de la superficie de terreno para cada rango de valores pixel del Índice NDVI, esto permitió determinar en que regiones del territorio se tienen los rangos más altos de actividad fotosintética y cuanta superficie significan, así como también determinar como han variado durante el periodo de estudio, para identificar alguna tendencia para lo cual se ha contrastado la información con una variable base de temperatura máxima mensual obtenida en base a datos de SENAMHI Bolivia de la Estación de ASAANA San Ignacio de Moxos.

4.5. Determinación del índice NDWI

Finalmente, a fin de comparar las tendencias de variación del NDVI obtenidas se procedió a la obtención del índice NDWI para el periodo “2020_02”, que permitió destacar en que regiones del TIM se observaba mayor presencia de cuerpos de agua y saturación de humedad alrededor de cuerpos de agua.

Esto permitió determinar que rangos del NDVI presentaban mayores valores de NDWI, denotando que se tratarían de bosques inundables, pampas arboladas y curichales anegados en las llanuras.

V. Resultados y Discusión

Se obtuvieron gráficas de cálculos de la variación de superficie en hectáreas para cada rango de valores NDVI, según el periodo temporal identificado entre 2016 y 2020, así también se desglosaron estos valores en graficas individuales para cada rango de valor de NDVI.

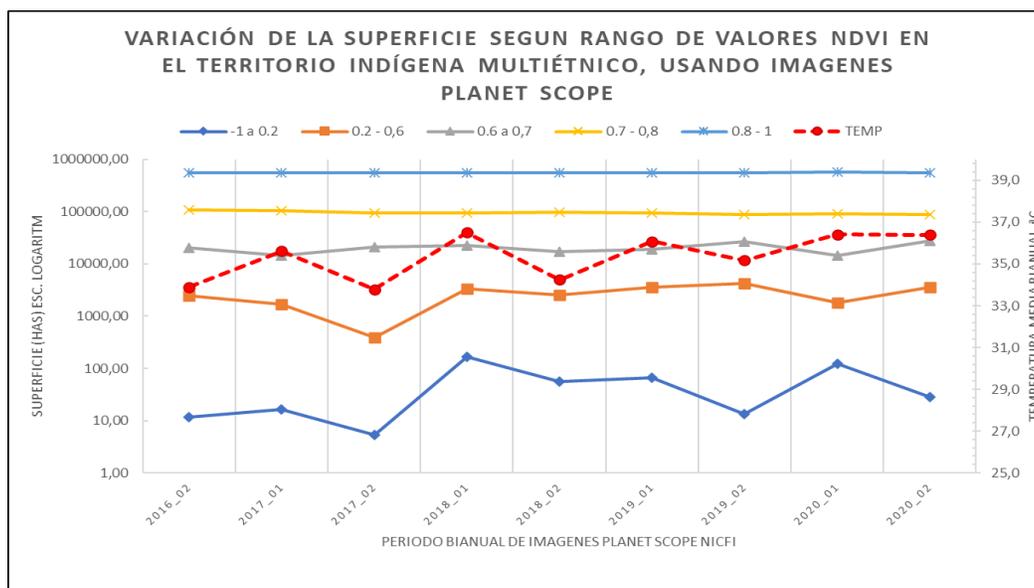
Tabla 3: Resumen de cálculos de superficie según rango NDVI en el TIM.

PERIODO	Superficie en hectáreas según rango NDVI					Temp Max. Med.
	No vegetación -1 a 0,2	Suelo sin Vegetación o escasa 0.2 - 0,6	Vegetación ligera 0.6 a 0,7	Vegetación media 0.7 - 0,8	Vegetación alta 0.8 - 1	
2016_02*	11,63	2429,47	20676,62	107731,57	549100,11	33,9
2017_01	16,40	1682,93	14644,85	105871,32	557733,87	35,6
2017_02	5,36	387,43	21281,28	94018,89	564253,95	33,8
2018_01	168,27	3353,39	22318,35	94271,93	559834,77	36,5
2018_02	56,79	2565,28	17326,24	99103,36	560895,54	34,3
2019_01	65,79	3529,05	19200,74	93873,69	563277,88	36,1
2019_02	13,23	4267,14	26898,49	89970,87	558797,30	35,2
2020_01	124,38	1.803,14	14.677,52	92.711,68	570.630,60	36,4
2020_02	27,86	3582,11	27362,42	88999,99	559974,91	36,4

* Los datos correspondientes al periodo 2016_01 fueron descartados debido a la alta nubosidad presente en la imagen.

A continuación, los datos tabulados son expresados mediante una gráfica:

Ilustración 2: Cálculo de la variación temporal de superficie según rango NDVI.



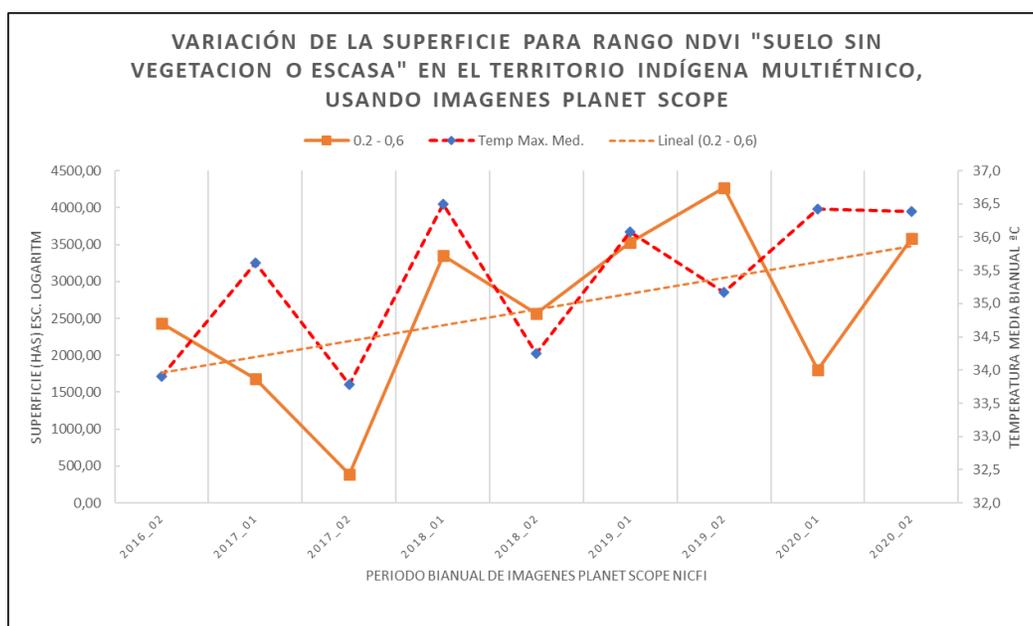
Tal como lo indica Merg en la tabla de rangos de NDVI propuestos, el rango de NDVI con valores menores a 0,2 indican cuerpos de agua y/o nubosidad presente en la imagen satelital, los cuales no presentan un patrón uniforme y representan una superficie apenas detectada por éste índice, si se requiere analizar datos referidos al estrés hídrico o cuerpos de agua el índice apropiado para este cálculo sería el NDWI, este rango no fue tomado en cuenta para las gráficas individuales.

En la grafica se observa que los rangos mayores a 0,7 presentan poca variación durante los periodos estudiados y representan la mayor superficie del TIM, el rango 0,6 a 0,7 muestra una variación leve, mientras que el rango 0,2 a 0,6 es el que mayor variación presenta.

En anexos se observan los mapas obtenidos para cada periodo.

A continuación, se muestran gráficas para cada rango evaluado:

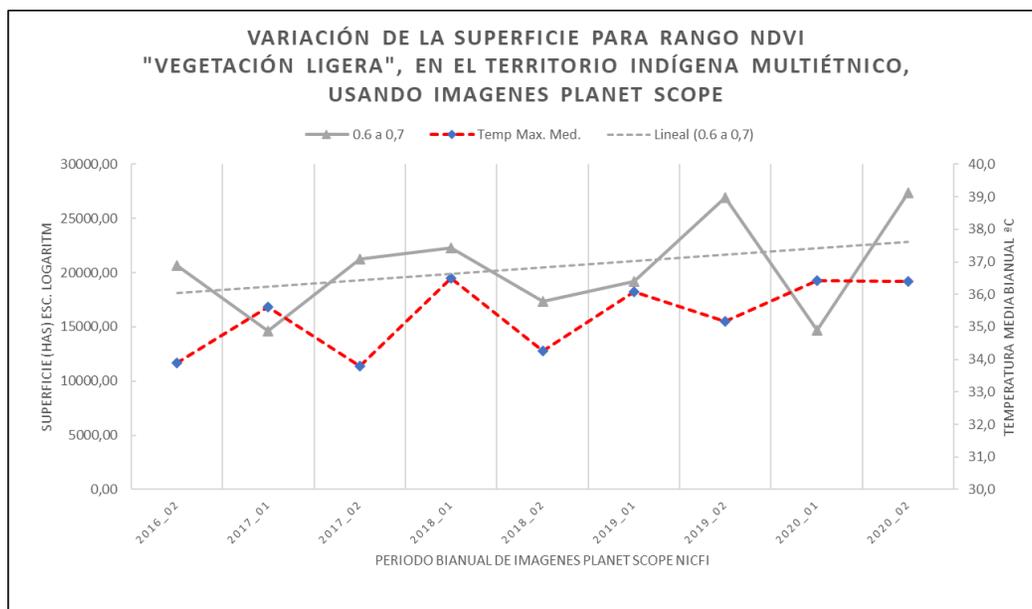
Ilustración 3: Rango del Índice NDVI 0,2 a 0,6 Suelo sin vegetación o vegetación escasa"



El rango entre 0,2 a 0,6 representa la superficie que ha sido detectada como “área sin vegetación o escasa”, pudiendo corresponder a caminos, brechas, chacos, desmontes nuevos, bancos de préstamo, espejos de agua con vegetación flotante entre otros, en los que se observa una tendencia general al incremento de superficie en este rango, se observa adicionalmente que existe cierta relación en cuanto a variación de temperatura entre los años 2017 a 2019,

mientras que los años 2016 primer semestre y 2020 primer semestre presentan rangos atípicos.

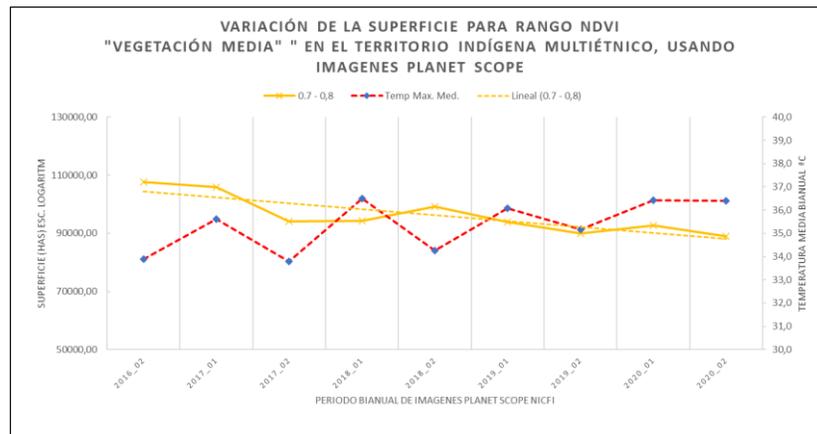
Ilustración 4: Rango del Índice NDVI 0,6 a 0,7 "Vegetación ligera"



El rango 0,6 a 0,7 de NDVI presenta mayor tasa de variación durante los periodos estudiados, aunque en cuanto a significancia de superficie corresponden a áreas menores que varían desde las 14.000 hectáreas hasta las 27.000, estos rangos corresponden a pampas inundables y pastizales, donde nuevamente existe una tendencia de incremento progresivo desde 2016 hasta 2020, en cuanto a su relación con las temperaturas la gráfica no es concluyente.

A continuación se observan los rangos 0,7 a 0,8 y mayores a 0,8, que son los que representan una mayor área boscosa:

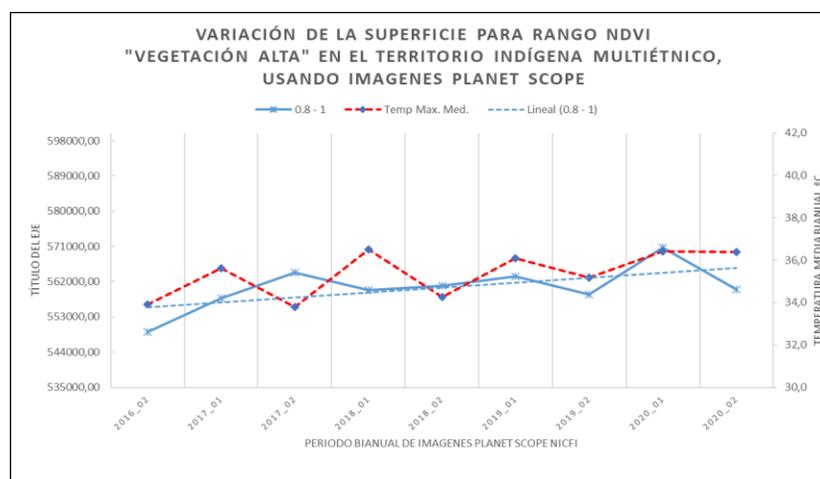
Ilustración 5: Rango del Índice NDVI 0,7 a 0,8 "Vegetación media"



El rango correspondiente a “vegetación media” con un valor de índice NDVI entre 0,7 a 0,8, ha variado entre 2016 a 2020 , abarca bosque que en el lapso de los periodos estudiados van desde las 89.000 hasta las 110.000 hectáreas aproximadamente, este rango se observa en la región este y norte del territorio correspondiendo mayormente a bosques inundables, bosques amazónicos próximos a pampas arboladas, que si bien representan a grandes áreas boscosas se observa una tendencia de disminución, considerando que para el segundo periodo de 2016 se tenían más de 100.000 hectáreas y para 2020 la superficie se redujo aproximadamente a 88.000 hectáreas.

Finalmente observamos la gráfica del rango 0,8 a 1:

Ilustración 6: Rango del Índice NDVI 0,8 a 1 "Vegetación alta"



Cabe destacar que se observa que el rango NDVI de 0,8 a 1, es el que presenta mayor estabilidad durante los periodos observados y es el que mayor superficie denota, variando

entre 540.000 hasta 570.000 hectáreas. Este valor está presente en la región central y sur del territorio y corresponde a las grandes masas de bosque amazónico en el que se observa un ligero incremento, que guarda cierta correlación con la temperatura máxima media para cada periodo, esto puede interpretarse como una tasa de mayor actividad fotosintética cuando la temperatura es mayor en las grandes masas de bosques amazónicos, pero se requerirán de estudios con mayor detalle para confirmar estas relaciones.

Por otro lado, al momento de realizar el cálculo del NDWI, resaltó que los valores más altos que corresponden a lagunas, curichales, bosques inundables y pampas arboladas próximas a zonas inundables como curichales, coincidía en gran manera con el rango de valores 0,7 a 0,8 del NDVI correspondientes a una vegetación media de bosques inundables y vegetación media. (Ver mapa en anexos).

VI. CONCLUSIONES.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado NDVI calculado en base a imágenes satelitales de Planet Scope de NICFI permiten conocer a mayor detalle la actividad fotosintética y la salud de la vegetación en el Territorio Indígena Multiétnico TIM dada la alta resolución de las imágenes y el periodo temporal de imágenes disponibles que permiten realizar un análisis multitemporal.

La región central y sur del TIM es la que tiene la mejor salud de vegetación con altas tasas de actividad fotosintética detectadas en base al Índice NDVI, correspondiendo a grandes masas boscosas de bosque amazónico no fragmentado, bosques de vegetación media y que se han mantenido estables durante el periodo estudiado.

La región norte y este del TIM, presentan una disminución de superficie en cuanto al rango NDVI de 0,7 a 0,8 que representa a vegetación media, este rango corresponde a bosques de dosel medio, bosques inundables y pampas arboladas.

Por otro lado se observa que los rangos NDVI entre 0.2 a 0.7 que corresponden a la áreas sin vegetación, vegetación escasa o vegetación ligera, presente con predominancia en la región este del territorio que si bien representa superficies menores de hasta 27.000 hectáreas (en comparación con el rango 0,8 a 1 con superficies de hasta 570.000 hectáreas) se encuentran con una tendencia de incremento, misma que podría derivar de la disminución del bosque de dosel medio, inundable o de pampas arboladas para convertirse en suelo sin vegetación o escaza (sembradíos o pasturas).

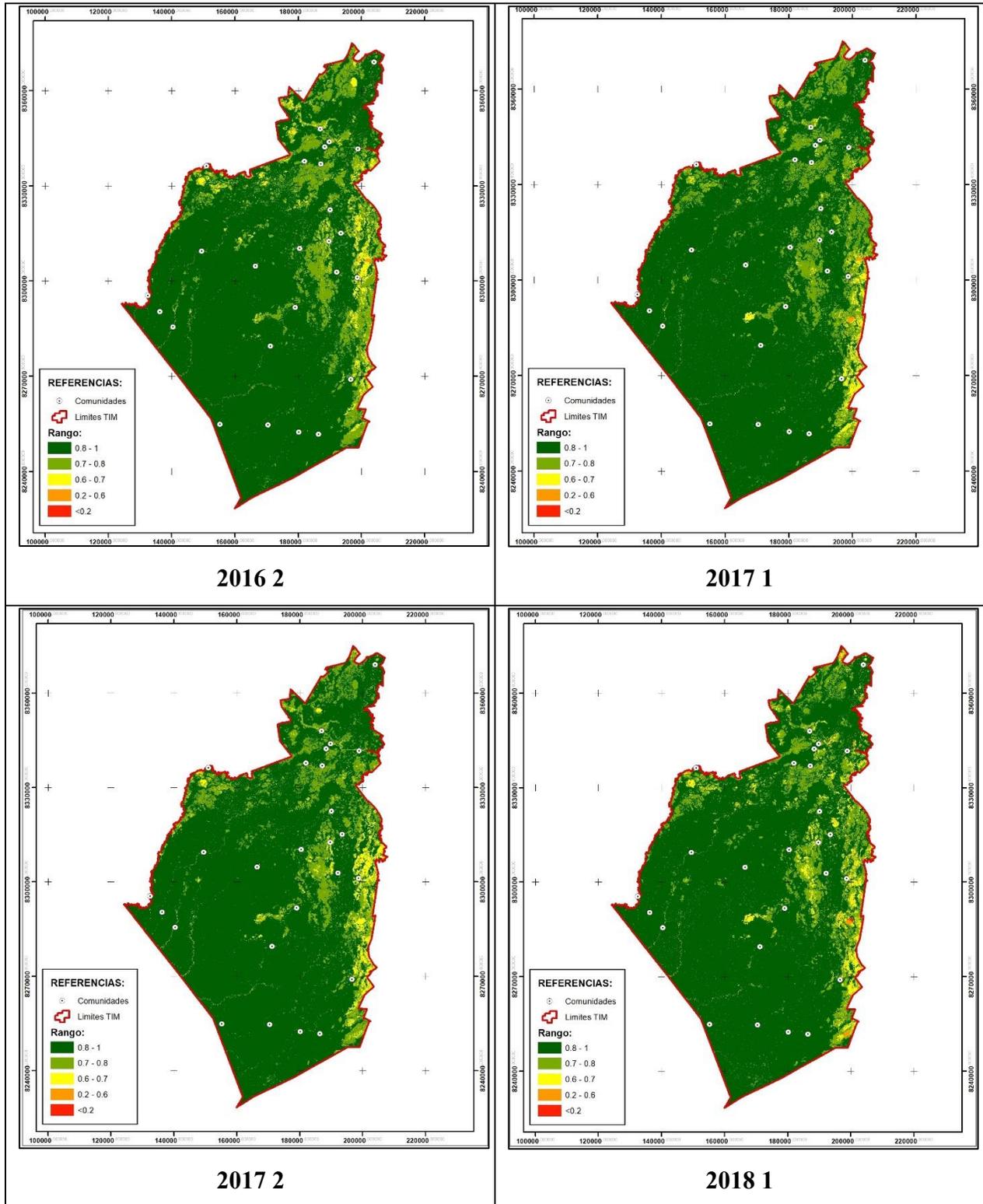
VII. RECOMENDACIONES

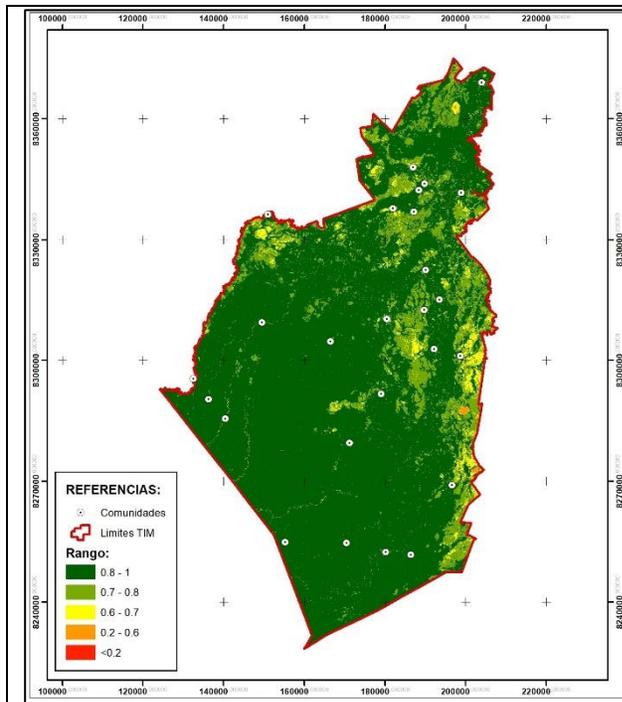
- Asegurar la protección de las regiones central y sur del territorio en que la salud de la vegetación es buena y tasa de actividad fotosintética que decanta en la captura de carbono y emisión de oxígeno es mayor.
- Realizar estudios de monitoreo multitemporales en base a parcelas representativas de los rangos NDVI identificados en el presente estudio, para regiones con mayor o menor intervención antrópica, a fin de obtener datos de validación representativos para cada rango. (Pudiendo tener parcelas en la Comunidad de Monte Grande del Apere donde se cuenta con una estación meteorológica y alguna comunidad del sector de los t'simanes donde se observa un bosque con mayor índice NDVI).
- Definir estrategias de manejo de recursos naturales en la zona este del territorio a fin de garantizar que el cambio de bosques por sembradíos o pastizales sea realizado bajo una planificación sostenible y que no comprometa la integridad de los bosques circundantes.
- Realizar estudios en base al Índice NDWI que permitan conocer la dinámica de cambio de las masas de agua detectadas por satélite, para contrastar o correlacionar la información con los resultados del presente reporte.

VIII. BIBLIOGRAFÍA.

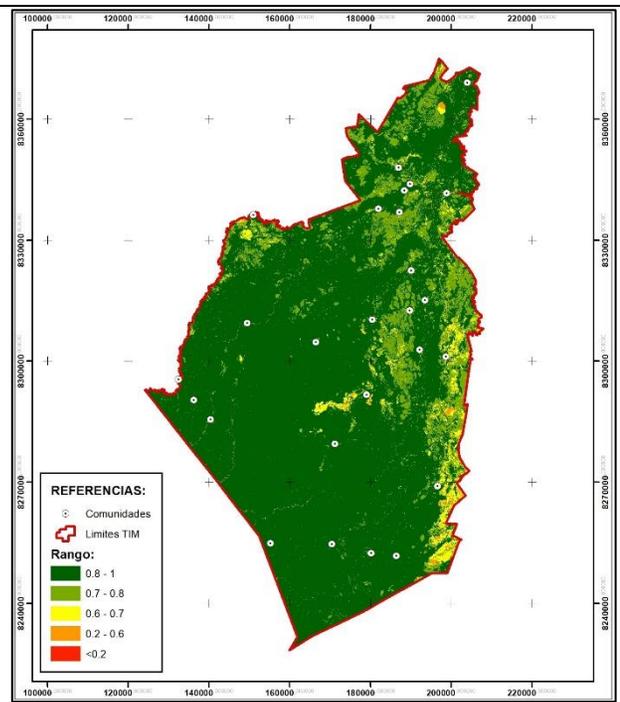
- Boris, L (2006). Vulnerabilidad de los bosques y sus servicios ambientales al Cambio climático. *CIRAD -CATIE*, 1–4.
- Cerezo Calderón, M. E. (2019). Evaluacion del potencial de erosión y determinacion de tasa de transporte de sedimentos mediante procesamiento en sig en la microcuenca Rio Roboré Dpto de Santa Cruz [U.A.G.R.M.]. In *Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologia U.A.G.R.M* (Vol. 1, Issue 1).
- Gobierno Autónomo Departamental de Santa Cruz. (2009). *PLUS Santa Cruz Memoria Tecnica*. 80.
- Maillard, O., Aguilera, V., & Uyuni, G. (2019). Evaluación De La Detección De La Deforestación Y Degradación Usando Claslite: Estudio de caso en un área Montañosa en Bolivia. *Kempffiana*, 15(1991–4652), 1–16.
- MMAyA, & APMT. (2022). *Actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada (CND) del Estado Plurinacional de Bolivia* (MMAyA (ed.)).
- ORE Organización de Apoyo Legal y Social. (2022). *PLAN DE GESTION Y CONTROL AUTÓNOMO DE LOS RECURSOS NATURALES Y BIODIVERSIDAD DEL TERRITORIO INDÍGENA MULTIÉTNICO TIM* (Vol. 1, Issue 1).
- Planet, KSAT, NICFI, & Ministerio Noruego de Clima y Ambiente. (2021). Programa de datos de NICFI. *Programa De Datos De NICFI - Guía de Usuario*, 14.
- Urioste, A. (2010). Deforestación en Bolivia: Una Amenaza mayor al cambio climático. In *Documento de Trabajo. Foro de desarrollo y democracia. Departamento de Biocomercio Sostenible. Fundación Amigos de la Naturaleza–Bolivia*.

IX. ANEXOS

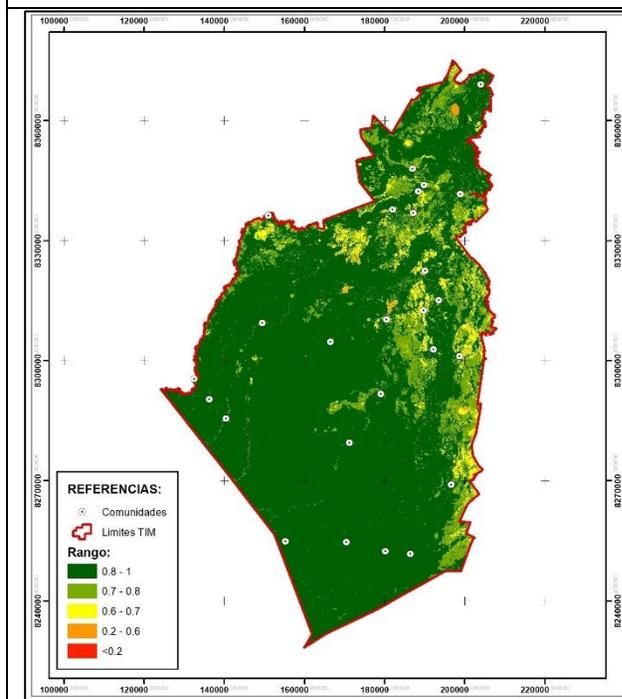




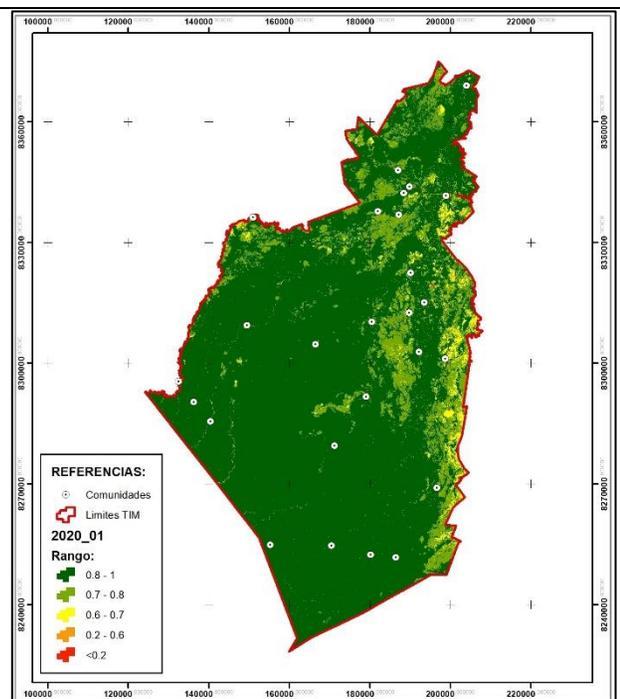
2018 2



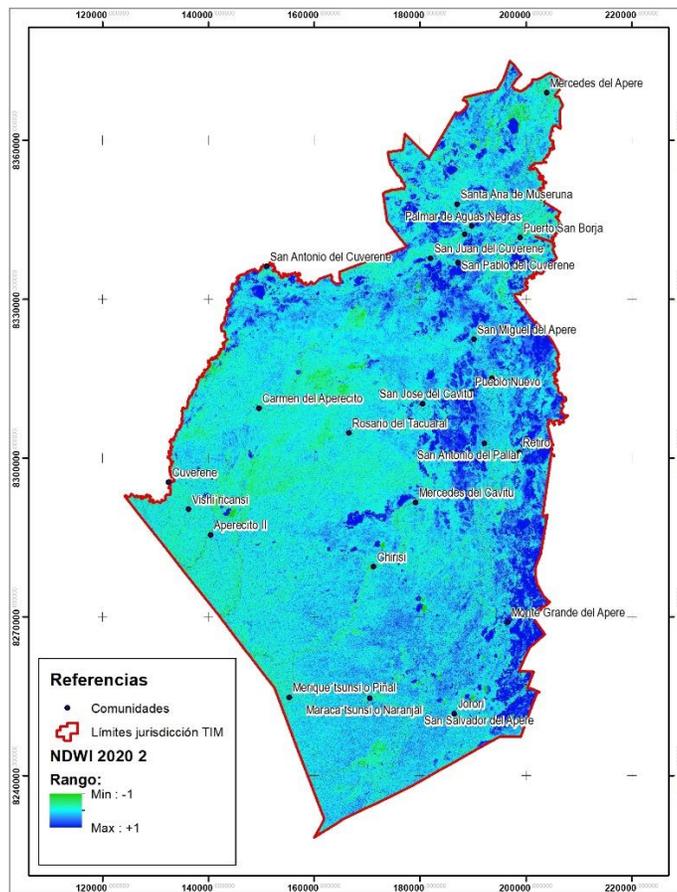
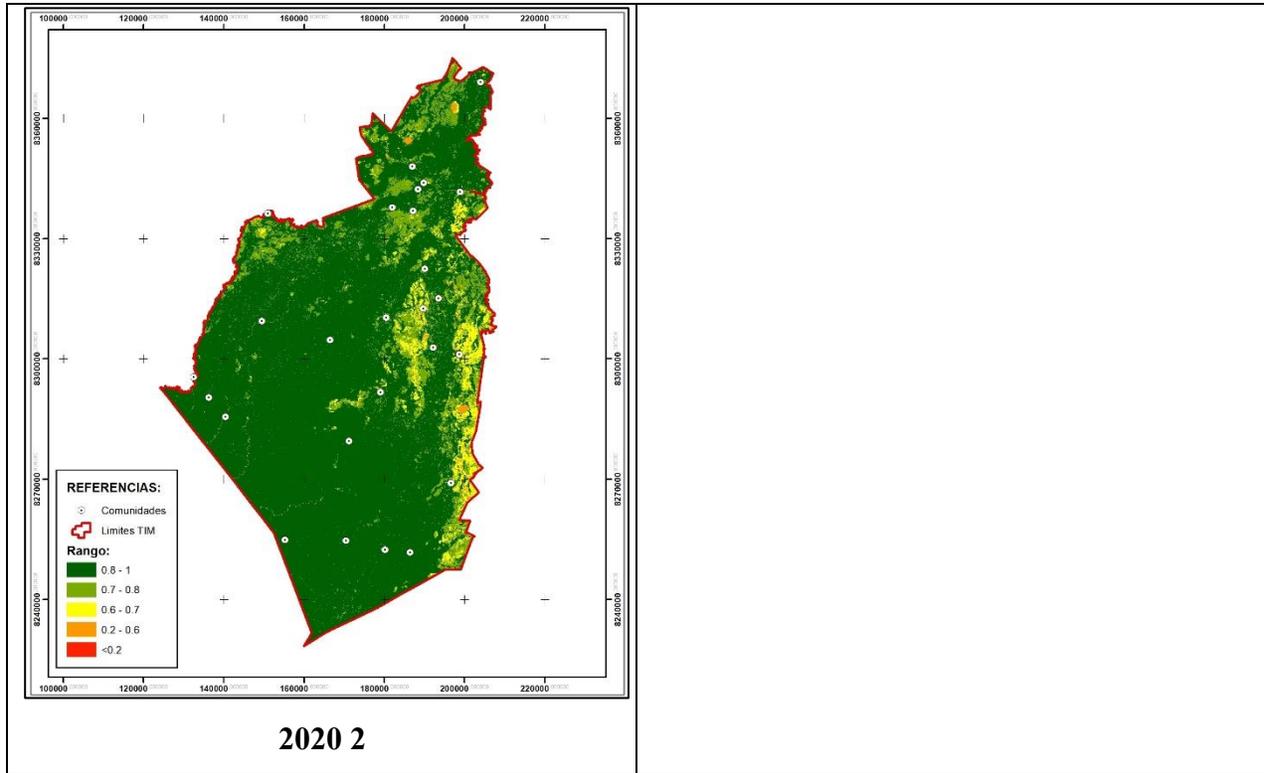
2019 1



2019 2



2020 1



Índice NDWI para el periodo 2020_02