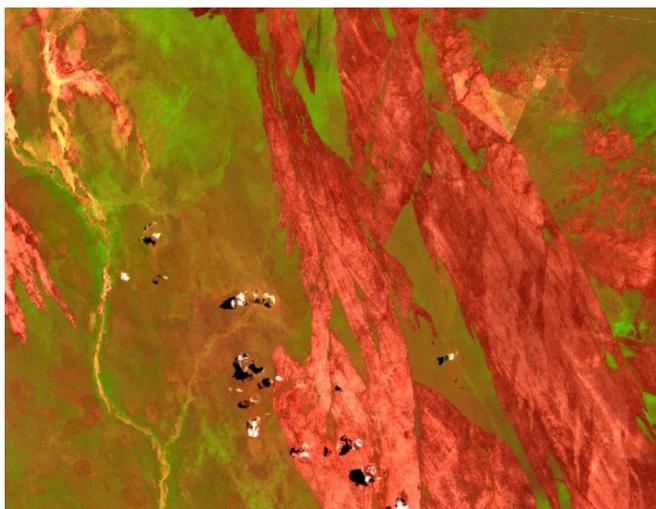




FUNDACIÓN PARA LA CONSERVACIÓN DEL BOSQUE CHIQUITANO  
MUSEO DE HISTORIA NATURAL NOEL KEMPPF MERCADO

Proyecto: Bases del conocimiento para la restauración  
*Con el financiamiento del Gobierno de Canadá*



REPORTE TÉCNICO

## **Protocolo metodológico estandarizado para evaluar procesos de regeneración postincendio en los sistemas socioecológicos en la Chiquitanía, Bolivia**

Autores:

Oswaldo Maillard, Marcio Flores-Valencia & Gilka Michme

Marzo de 2021

Santa Cruz de la Sierra, BOLIVIA

**Cita de referencia:** Maillard, O., Flores-Valencia, M. & G. Michme. 2021. Protocolo metodológico estandarizado para evaluar procesos de regeneración postincendio en los sistemas socioecológicos en la Chiquitanía, Bolivia. Informe técnico del Observatorio Bosque Seco Chiquitano. Proyecto Bases del conocimiento para la restauración. Fundación para la conservación del Bosque Chiquitano. Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado. Santa Cruz, Bolivia, 31 pag.



## INTRODUCCIÓN

En el año 2019, Bolivia fue el escenario de una serie de incendios forestales, que dieron como resultado una superficie quemada tres veces mayor a la registrada en 2018, y también superior en un 51% del promedio de la serie temporal del periodo 2001-2018 (Lizundia-Loiola *et al.* 2020). En el departamento de Santa Cruz, los incendios impactaron un área de 3.7 millones de hectáreas y se localizaron principalmente en la región de la Chiquitanía, de los cuales el 60% fueron áreas boscosas (Maillard *et al.* 2020a), del Bosque Seco Chiquitano, Cerrado, Chaco y vegetación asociada a los humedales del Pantanal (Anívarro *et al.* 2019). Para el 2020, Santa Cruz volvió a tener una crisis de incendios con 2.2 millones de hectáreas quemadas, del que el 58% eran bosques (Flores-Valencia & Maillard 2021). La regeneración de estos ecosistemas impactados por los incendios es de alta prioridad y representa uno de los más grandes desafíos en términos ambientales, ya que se necesita de mucho esfuerzo para reconectar los fragmentos boscosos impactados y revertir la situación, especialmente en cuanto a la pérdida en términos de biodiversidad y el almacenamiento de importantes reservas de carbono (Maillard 2020).

A medida que se disponga de mayor información y tecnologías accesibles, es importante que se desarrollen métodos simples y de fácil acceso para evaluar la dinámica de los cambios, causados por perturbaciones tanto naturales como antropogénicas a una escala de paisaje. Esto es esencial para permitir que los investigadores y los responsables políticos, comprendan los procesos de restauración de los ecosistemas, posterior al impacto producido por los incendios forestales o la deforestación. Existen diversas maneras de hacer estas evaluaciones, sin embargo, las tecnologías de teledetección han sido ampliamente probadas y sugeridas como herramientas para cuantificar la dinámica de los ecosistemas debido a su capacidad para proporcionar mediciones consistentes y repetibles (Coppin *et al.* 2004).

En este sentido, el protocolo que se presenta pretende servir como guía metodológica dirigida a diversos usuarios que quieran estudiar la dinámica de los procesos de la restauración de los sistemas socioecológicos, posterior al impacto producido por los incendios forestales. Este protocolo está organizado en dos secciones; la primera concerniente a evaluaciones de campo para determinar la severidad de los incendios, en tanto que la segunda, se enfoca a describir las herramientas tecnológicas de libre acceso para realizar los análisis de sensores remotos.

## SECCIÓN 1: EVALUACIÓN DE CAMPO

### *Índice Compuesto de Quemadas (CBI)*

La severidad de los incendios forestales debe ser evaluada en el campo, para de esta manera identificar el nivel de impacto de afectación en la estructura de los ecosistemas y la dinámica de los procesos de la regeneración natural. En este protocolo se propone el uso de la metodología del CBI (Composite Burn Index). El índice CBI fue desarrollada por Key & Benson (2006) y ha sido aplicado y ajustado en una amplia variedad de ecosistemas (De Santis & Chuvieco, 2009). Es aconsejable que la decisión de la instalación de las parcelas sea a partir de un muestreo estratificado aleatorio, en diferentes niveles de severidad detectados preliminarmente con los índices espectrales (p.ej., dNBR), pero no siempre será posible seguir rigurosamente este procedimiento.

La cantidad y ubicación de los sitios pueden ser escogidos en campo en base a la experiencia de personas que habitan en el área y considerado la homogeneidad de los tipos de vegetación en las cicatrices de quemadas identificadas. El tamaño de las parcelas que se propone para realizar los estudio es de 20×20 (400 m<sup>2</sup>), sin embargo, esto puede variar en relación a resolución espacial de las imágenes de satélite que serán utilizadas posteriormente para realizar otros análisis.

En cada CBI se deben describir las características del lugar, identificar en lo posible las especies botánicas más abundantes, coordenadas y cuatro registros fotográficos de respaldo para los cuatro puntos cardinales.

La metodología consiste en rellenar una planilla estandarizada (Anexo 1) modificada en base a lo propuesto por Key & Benson (2006), siguiendo una guía de instrucciones (Anexo 2). En la planilla se debe indicar la afectación del fuego en el sustrato superficial del suelo; hierbas, arbustos y árboles de menos de 1 m de altura; arbustos y árboles de 1 a 5 m de altura; árboles intermedios de 10-25 cm de diámetro de tronco y 8-20 m de altura; y grandes árboles emergentes.

Posteriormente, los puntajes de los atributos se deben agregar jerárquicamente para los cinco estratos, desde el sotobosque hasta el dosel, y luego promediar todos los valores obtenidos para obtener un puntaje final. Además, los resultados obtenidos en las parcelas CBI, puede ser agrupados finalmente en categorías para un mejor entendimiento de los niveles de severidad. Arellano *et al.* (2017) propone la siguiente categorización:

CBI	Categoría
0-0,25	Sin quemar
0,25-1,25	Baja
1,25-2,25	Moderada
2,25-3	Alta

## Anexo 1. Planilla de Índice Compuesto de Quemados (CBI).

FACTORES DE CALIFICACIÓN DE ESTRATOS		ESCALA DE GRAVEDAD DE QUEMA							Puntaje total
		Sin Efecto	Bajo		Moderado		Alto		
		0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
<b>A. SUSTRATOS</b>									
A 1	<i>Hojarasca/Combustible liviano</i>	Sin cambio	--	50% hojarasca	--	100% hojarasca	>80% combustible liviano	98% combustible liviano	
A 2	<i>Materia orgánica en descomposición</i>	Sin cambio	--	Carboncillo ligero	--	50% perdido	--	Consumida	
A 3	<i>Combustible mediano</i>	Sin cambio	--	20% consumido	--	40% consumido	--	>60% perdido, gran cambio	
<b>B. HIERBAS, ARBUSTOS BAJOS Y ARBOLES DE MENOS DE 1 METRO</b>									
B 1	<i>% Follaje alterado</i>	Sin cambio	--	30%	--	80%	95%	100% + Perdida de ramas	
B 2	<i>% de individuos vivos</i>	100%	--	90%	--	50%	< 20%	Ninguno	
<b>C. ARBUSTOS ALTOS Y ARBOLES DE 1 A 5 METROS:</b>									
C 1	<i>% Follaje alterado</i>	0%	--	20%	--	60-90%	> 95%	Considerable Perdida de ramas	
C 2	<i>% de individuos vivos</i>	100%	--	90%	--	30%	< 15%	< 1%	
<b>D. ARBOLES INTERMEDIOS (SUBDOSEL, ARBOLES DEL TAMAÑO DE UN POSTE)</b>									
Número de individuos vivos antes del fuego=									
D 1	<i>% Verde (Sin alteración)</i>	100%	--	80%	--	40%	< 10%	Ninguno	
D 2	<i>% Negro (Quemado)</i>	Ninguno	--	5-20%	--	60%	> 85%	100% +Perdida de ramas	
D 3	<i>% Café (Chamuscado)</i>	Ninguno	--	5-20%	--	40-80%	< 40 o > 80%	Ninguno debido a quema	
D 4	<i>% Mortalidad del dosel</i>	Ninguno	--	15%	--	60%	80%	100%	
D 5	<i>Altura del carbón</i>	Ninguno	--	1.5m	--	2.8m	--	> 5m	
Post-Fuego: %Cañoteados=                      %Caídos=                      %Mortalidad de árboles=									

## **Anexo 2. Guía de instrucciones para relleno de planilla CBI.**

### ***Estratos***

**Sustratos:** materiales superficiales inertes de suelo, hojarasca, materia orgánica descompuesta y combustibles leñosos caídos. **Hierbas, arbustos bajos y árboles:** todas las gramíneas + hierbas y arbustos + árboles pequeños <1m. **Arbustos y árboles altos:** arbustos y árboles de 1–5 m de altura. **Árboles intermedios (tamaño de poste, subdosel):** árboles entre arbustos / árboles altos y la copa superior, de aproximadamente 8–15 m de altura. Pueden ser alturas estratificadas y extenderse hasta el dosel superior, pero el dosel recibe poca luz solar directa. El tamaño es relativo al dosel superior y varía según la comunidad de especies. Si este tamaño es el dosel superior, cuente como árboles intermedios. **Árboles grandes (maduros, dominantes y codominantes, dosel superior):** más grandes que los árboles intermedios, ocupan la copa superior, reciben luz solar directa; el más alto puede extenderse por encima del nivel promedio de árbol grande. **Sotobosque:** sustratos, hierbas / arbustos bajos + árboles, arbustos altos + árboles. **Dosel** - Árboles intermedios y grandes. **Parcela total o general:** todos los estratos de la parcela combinados.

**Factores de calificación del sustrato (no cuente la hojarasca o los combustibles acumulados después del incendio).**

**Hojarasca / Combustible ligero:** cantidad relativa consumida de hojas, ramitas y madera de <8 cm) de diámetro en el suelo al momento del incendio. No considere la nueva de hojarasca caída después de la quema. Estimar la hojarasca/ combustible ligero incluso si ocurre debajo de las plantas vivas. **Condición materia orgánica descompuesta:** cantidad relativa consumida y carbonización del material orgánico descompuesto que se encuentra debajo de la hojarasca. No es una masa fina de raíz. Estimar la materia orgánica descompuesta incluso si ocurre debajo de plantas vivas. **Combustible medio:** consumo de combustible leñoso entre 8 y 20 cm. **Combustible grande:** pérdida y carbón del combustible leñoso caído de >20 de diámetro. Omita o únase como una sola clase, si el combustible es <5 % de cobertura de la parcela. Incluya tocones en la clase de tamaño apropiado, si corresponde.

### ***Hierbas, arboles bajos y árboles menos de 1 metro factores de clasificación***

**Porcentaje de follaje alterado:** solo arbustos y árboles bajos (<1 m), antes del incendio una cubierta viva o muerta que esté recién marrón, negra o consumida. Ignorar brotes vegetativos. **Frecuencia de porcentaje individuos vivos:** porcentaje de vegetación antes del incendio que aún está viva después del incendio, según el número de la parcela; supervivencia, no considerar cobertura de nuevas plántulas. Incluyen hierbas perennes no quemadas, así como quemadas, que brotan, arbustos bajos y árboles de toda la parcela (<1 m). Incluya toda la vegetación no quemada, así como las plantas quemadas que no han tenido suficiente tiempo para retoñar pero que siguen siendo viables. Las plantas quemadas pueden necesitar ser examinadas por puntos de crecimiento viables. No incluya nuevas plantas de semillas o retoños. **Colonizadores** - Posible dominio 2–3 años después del incendio de nuevas plantas (nativas o exóticas) a partir de semillas; incluye hierbas y plántulas de árboles, u otros retoños de árbol a arbusto, y plantas no vasculares. **Composición de especies / abundancia relativa** - Cambio en especies y / o abundancia relativa de especies anticipado 2–3 años después del incendio. ¿Cuánto se parece a la composición de especies post fuego estrato antes del

incendio? Considere la presencia de especies nuevas o ausencia de las anteriores, además de cómo se extiende el dominio a través de especies.

#### ***Árboles y árboles altos factores de calificación de 1 a 5 metros***

***Porcentaje de follaje alterado:*** el porcentaje del volumen del dosel vivo o muerto (hojas, tallos) que presente un color marrón, negro o recién quemado. Ignorar nuevos brotes vegetativos; eso *no* disminuye la cantidad de follaje alterado. ***Porcentaje de individuos vivos:*** porcentaje de arbustos / árboles altos que aún están vivos después del incendio. Esta es una medida de supervivencia basada en el número de individuos. Incluya arbustos / árboles altos no quemados, así como quemados pero viables de 1–5 m. Examine los puntos de crecimiento para determinar la viabilidad si es necesario. No incluya nuevas plantas de semillas o retoños. Tenga en cuenta la mortalidad potencial que podría ocurrir hasta 2 años después del incendio. ***Cambio porcentual en la cobertura:*** *disminución* general en la cobertura de arbustos / árboles altos entre 1 y 5 m, en relación con el área ocupada por esas plantas antes del incendio. Estime la regeneración de las plantas que se quemaron, más las plantas no quemadas como cobertura que disminuye la cantidad de disminución de la cobertura. No incluya retoños o plantas recién germinadas de semillas. ***Composición de especies / abundancia relativa*** cambio en composición de especies y / o abundancia relativa de especies anticipado de 2 a 3 años después del incendio.

#### ***Factores de calificación de árboles intermedios y grandes (combinados)***

***Porcentaje sin alterar (verde):*** el porcentaje del dosel vivo o muerto inalterado por el fuego. Incluye nuevos rebrotes de dosel quemado, no desde la base. ***Porcentaje negro:*** el porcentaje del volumen de dosel vivo o muerto antes del incendio que realmente se quemó (tallos negros o consumidos, hojas). Puede o no ser viable después del fuego; el rebrote del dosel no disminuye el porcentaje de negro. En alta severidad, el consumo de ramificación fina es evidente. Incluye dosel ennegrecido. ***Porcentaje marrón (chamuscado):*** el porcentaje del volumen vivo del dosel antes del incendio afectado por el chamuscado o la faja sin contacto directo con la llama. El marrón se debe al calentamiento próximo, donde el follaje no se incendió. Incluye mortalidad retrasada, daño por insectos y follaje marrón que ha caído al suelo. ***Porcentaje de mortalidad del dosel:*** el porcentaje del volumen vivo del dosel antes del incendio formado por árboles muertos directa o indirectamente por el fuego dentro de 1 a 2 años. ***Altura del carbón:*** altura media del carbón de las llamas del suelo promediada sobre todos los árboles. La media del carbón es una altura promedio entre las alturas superior e inferior de un árbol. Incluya árboles no quemados (altura del carbón = 0) y quemados *solo* cuando la altura del carbón sea discernible. ***No*** incluya negro del fuego del dosel; ingrese N/A para la mayoría de las quemaduras de fuego del dosel.

#### ***Consejo de calificación***

Los factores que no son aplicables o que no se pueden resolver en una parcela no se califican; se omiten de las clasificaciones compuestas de esa parcela. Además, si hay mucha incertidumbre acerca de cómo se debe calificar un factor específico, o si es relevante para la parcela, entonces ese factor debe dejarse sin calificar. Solo se usa el número de factores calificados para calcular los promedios. Si un factor no está calificado, ingrese no aplicable (N/A) o incertidumbre (UC) en el formulario de datos CBI. No solo deje el campo en blanco; tales factores no son parte del CBI promedio, pero uno quiere saber si estos factores se evaluaron realmente y se decidió no calificarlos, o simplemente se pasaron por alto y se

omitieron accidentalmente. Los ceros, por otro lado, son entradas válidas y se promedian en puntajes compuestos. Los ceros deben usarse cuando un factor de calificación es aplicable y exhibe una condición no quemada. Un cero representa ningún cambio detectado en un factor observable.

## SECCIÓN 2: SENSORES REMOTOS

En esta sección se describen algunos productos de datos satélites de observación terrestre más utilizados en investigación de regeneración de coberturas vegetales, los índices espectrales y las plataformas de acceso libres para procesar estas imágenes.

### **Landsat**

Landsat es un programa conjunto entre la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) que ofrece el catálogo más amplio de observaciones de la Tierra a nivel global, desde su origen en 1975 hasta el día de hoy. En la actualidad, solo dos de estos satélites, Landsat 7 (fallo del corrector de línea de escaneo) y Landsat 8, continúan adquiriendo información de la cobertura terrestre. Las imágenes Landsat son adquiridas a través de varios instrumentos de operación a bordo, entre los que se encuentra el Multispectral Scanner Sensor (MSS) en la flota Landsat (1-3), Thematic Mapper (TM) en Landsat 4 y 5, y el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) en Landsat 7. Posteriormente se incorporaron dos nuevos instrumentos en el Landsat 8: el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). Estos dos sensores proporcionan imágenes a 30 metros de resolución (visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta), 100 metros (térmico) y 15 metros (pancromático). El sensor OLI proporciona, además de las clásicas bandas, una adicional para detectar cirros en la atmósfera y otra para la observación de las costas.

Además, el USGS ha desarrollado productos científicos de nivel 2 y 3 con calidad de investigación para toda la serie histórica, listos para aplicaciones, derivados de datos de Landsat de nivel 1, que se pueden usar para monitorear, evaluar y proyectar cómo los cambios en el uso de la tierra, la cobertura de la tierra y las condiciones de la tierra afectan a las personas y la naturaleza.

Las imágenes de Landsat pueden ser visualizadas rápidamente con ayuda de la aplicación web LandViewer (<https://eos.com/landviewer>). Además, se pueden descargar para su procesamiento en el enlace EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>).

Más información sobre las características de los satélites, los sensores, bandas espectrales y los productos de datos, pueden ser encontrados en el siguiente enlace: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>

### **Sentinel-2**

La misión Copernicus Sentinel-2 comprende una constelación de dos satélites en órbita polar colocados en la misma órbita sincrónica del sol, en fases a 180 ° entre sí. Su objetivo es monitorear la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre, y su amplia franja (290 km) y alto tiempo de revisión, con 10 días en el ecuador con un satélite y 5 días con 2 satélites en condiciones sin nubes. Los satélites gemelos Sentinel-2A y Sentinel-2B se lanzaron el 22 de junio de 2015 y el 7 de marzo de 2017. Ambos, facilitan imágenes ópticas de alta resolución para los servicios terrestres, proporcionando imágenes de la vegetación, el suelo y la cobertura de agua, las vías de navegación interior y las zonas costeras, respectivamente. Esto lo hace a través del instrumento óptico MSI (Instrumento

multiespectral) que muestrea 13 bandas espectrales: cuatro bandas a 10 m, seis bandas a 20 m y tres bandas a 60 m de resolución espacial.

Las imágenes de Sentinel-2 pueden ser visualizadas rápidamente con ayuda de dos aplicaciones web gratuitas, además de obtener algunos índices espectrales: Sentinel Playground (<https://www.sentinel-hub.com/explore/sentinelplayground>) y EO Browser (<https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser>).

Mayor información sobre las características de los satélites, los sensores, bandas espectrales y los productos de datos, pueden ser encontrados en el siguiente enlace: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>

## **Índices espectrales**

### **Índice de Vegetación 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. El NDVI permite hacer un monitoreo de la vegetación en periodos de tiempo cortos o recurrentes, y es uno de los índices más ampliamente utilizados, dado que, en diversos estudios se han determinado relaciones significativas entre este índice y aspectos claves de la estructura y funcionalidad de los ecosistemas, tales como el contenido de biomasa (Tucker *et al.* 1985), el índice de área foliar (Steltzer & Welker 2006) y la productividad primaria neta aérea (Paruelo *et al.* 1997). El índice NDVI, se genera a partir de las bandas espectrales del rojo visible (VIS) y el infrarrojo cercano (NIR), a través de la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{VIS}) / (\text{NIR} + \text{VIS})$$

A continuación, se describen las bandas que se usan para las imágenes de satélite:

$$\text{Landsat 4 - 7} = (\text{B4} - \text{B3}) / (\text{B4} + \text{B3})$$

$$\text{Landsat 8} = (\text{B5} - \text{B4}) / (\text{B5} + \text{B4})$$

$$\text{Sentinel-2} = (\text{B8} - \text{B4}) / (\text{B8} + \text{B4})$$

### **Relación Normalizada de Quemadas (NBR)**

La severidad de las quemadas se calcula mediante el análisis del índice NBR (Relación Normalizada de Quemadas) propuesto por Key & Benson (2006), que destacan los cambios en la reflectividad de la vegetación cuando esta se ve afectada por el fuego. El índice NBR toma valores entre 0 y 1, y para determinarlo, se utilizan las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), donde este último, a diferencia del anterior que decrece, tiende a incrementarse por el aumento de la sequedad. Es índice se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$\text{NBR} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

A continuación, se describen las bandas que se usan para las imágenes de satélite:

$$\text{Landsat 4 - 7} = (B4 - B7) / (B4 + B7)$$

$$\text{Landsat 8} = (B5 - B7) / (B5 + B7)$$

$$\text{Sentinel-2} = (B8 - B12) / (B8 + B12)$$

Los cálculos del NBR se deben generar para las imágenes previos al incendio (pre-incendio) y posterior al incendio (post-incendio). Para estimar la severidad, NBR diferencial o Delta NBR (dNBR o  $\Delta\text{NBR}$ ) (Relación Normalizada de Quemadas delta) se determina a través de la diferencia entre el NBR previo y posterior al incendio. Los valores más altos de dNBR indican un daño más severo, mientras que las áreas con valores negativos del dNBR pueden indicar un nuevo crecimiento después de un incendio. La expresión utilizada para calcular dNBR se indica a continuación:

$$\text{dNBR o } \Delta\text{NBR} = (\text{preNBR} - \text{postNBR}) * 1000$$

En base a Key & Benson (1999), los resultados del dNBR se pueden clasificar en siete niveles de severidad:

dNBR	Categoría
< -0,25	Alto repoblamiento
-0,25 a -0,1	Bajo repoblamiento
-0,1 a 0,1	Sin quemar
0,1 a 0,27	Baja severidad
0,27 a 0,44	Moderada severidad
0,44 a 0,66	Moderada-alta severidad
>0,66	Alta severidad

### Google Earth Engine

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma de código abierto basada en la web para el análisis geoespacial, y actualmente es gratuita para fines de investigación y educación (Nyland *et al.* 2018, Kumar *et al.* 2018, Gorelick *et al.* 2017). GEE permite a los usuarios ejecutar algoritmos en imágenes y vectores georreferenciados almacenados en la infraestructura de Google. Además, GEE tiene la capacidad de almacenamiento y computación en la nube de última generación, de un gran catálogo de datos de teledetección, lo que permite a los investigadores y a la comunidad científica trabajar sin costo, en billones de imágenes de satélite (Nyland *et al.* 2018, Gorelick *et al.* 2017), en las que se incluyen los datos de resolución media para todo el archivo Landsat, así como archivos completos de datos de Sentinel-1 y Sentinel-2; y las imágenes diarias de la Tierra mediante espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS).

En los últimos años, GEE se ha utilizado ampliamente para aplicaciones a escala global, como caracterizar el cambio de la cubierta boscosa (Hansen *et al.* 2013) y automatizar las rutinas de clasificación de imágenes para el mapeo de la vegetación y la cobertura terrestre (Nyland *et al.* 2018, Langner *et al.* 2018, Parente *et al.* 2018).

Para acceder a esta plataforma solo es necesario contar con una cuenta de google y realizar un único registro en el portal: <https://earthengine.google.com/>. Una vez registrado se puede ingresar al editor de códigos de GEE (Fig. 1) en el link: <https://code.earthengine.google.com/>

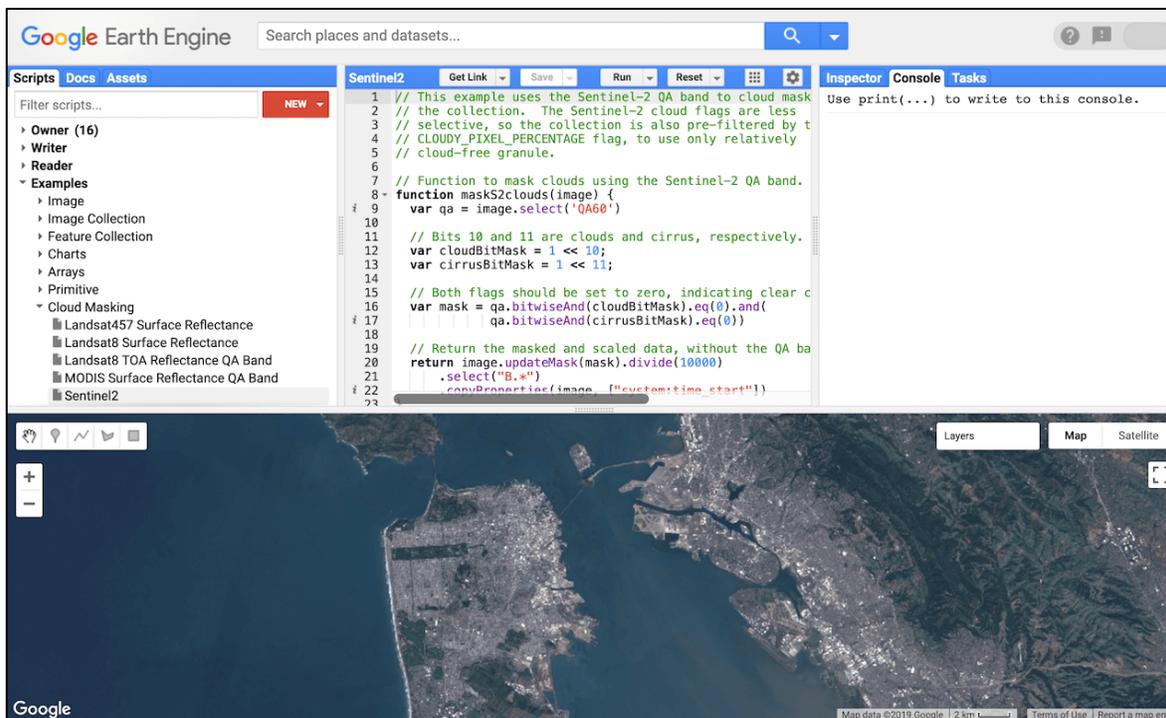


Figura 1. El editor de código de GEE en: <https://code.earthengine.google.com/>

El panel central proporciona un editor de código JavaScript (Fig. 1). Sobre el editor hay botones para guardar el script actual, ejecutarlo y borrar el mapa. El botón Obtener enlace genera una URL única para el script en la barra de direcciones. El mapa del panel inferior contiene las capas agregadas por el script. En la parte superior hay un cuadro de búsqueda de conjuntos de datos y lugares. El panel izquierdo contiene ejemplos de código, sus scripts guardados, una referencia de API con capacidad de búsqueda y un administrador de activos para datos privados. El panel derecho tiene un inspector para consultar el mapa, una consola de salida y un administrador para tareas de larga duración. El botón de ayuda (help) en la parte superior derecha contiene enlaces y otros recursos para obtener más información.

Información adicional para empezar a programar con la API de JavaScript de GEE, puede ser encontrado en el enlace: <https://developers.google.com/earth-engine/guides>. Para usuarios de habla hispana, un botón situado en la parte superior permite traducir la página.

Además, los tutoriales para obtener una introducción a JavaScript y ejercicios más detallados para usar la API de GEE, pueden ser consultados en la dirección: <https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/tutorials#introduction-to-earth-engine->

[condensed](#). Para usuarios de habla hispana, el servicio de los videos YouTube permite generar la traducción de subtítulos de los tutoriales.

## Aplicaciones de GEE para monitoreo de cambios en la vegetación (no expertos)

Las aplicaciones o Apps de GEE son interfaces de usuario dinámicas, donde los expertos pueden utilizar elementos simples de la interfaz de usuario para aprovechar el catálogo de datos y el poder analítico de Earth Engine (<https://www.earthengine.app>), para que los utilicen tanto los expertos como los no expertos. Se puede acceder a las aplicaciones publicadas desde GEE desde la URL específica de la aplicación generada en el momento de la publicación. No se requiere una cuenta de GEE para ver o interactuar con una aplicación publicada.

Durante los últimos años se han desarrollado Apps en GEE de fácil acceso y en procesos automatizados que duran algunos segundos o minutos, para evaluar la dinámica de los cambios, causados por perturbaciones tanto naturales como antropogénicas a una escala de paisaje, desde la deforestación hasta las áreas impactadas por los incendios.

Para determinar las tendencias de cambio de la vegetación, existen aplicaciones desarrolladas en GEE, como es el caso del algoritmo Clasificación y Detección de Cambio Continuo (CCDC, <https://parevalo-bu.users.earthengine.app/view/visualize-ccdc>). El CCDC permite modelar características espectrales temporales que incluyen estacionalidad, tendencias y variabilidad espectral (Arévalo *et al.* 2020). Esta herramienta permite a los usuarios interactuar con series de tiempo de observaciones Landsat y los resultados de la implementación GEE del algoritmo CCDC, así como crear productos a partir de ellos (Fig. 2).

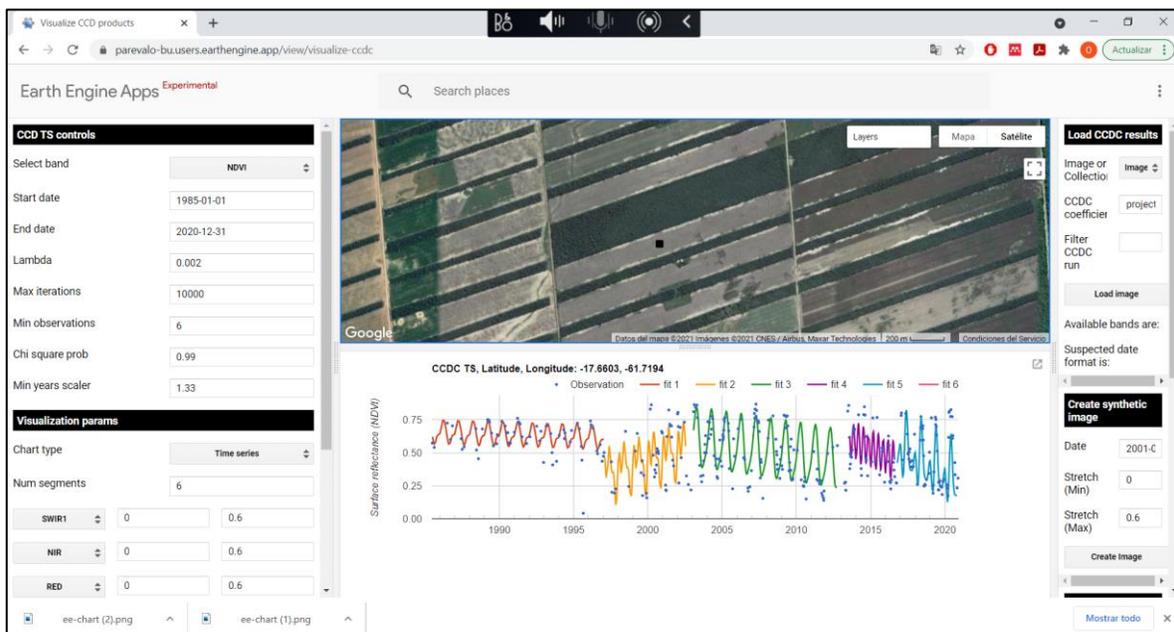


Figura 2. Interfaz gráfica del algoritmo Clasificación y Detección de Cambio Continuo (CCDC).

CCDC es un algoritmo de series de tiempo "en línea", lo que significa que comienza en el inicio de la serie de tiempo y se actualiza a medida que se encuentran disponibles nuevas observaciones. Así, al principio, una vez que hay suficientes observaciones, se ajusta un modelo de series de tiempo. Si las nuevas observaciones agregadas a la serie temporal no difieren mucho del modelo, las nuevas observaciones se agregan a la serie temporal y se ajusta un modelo actualizado. Cuando las nuevas observaciones ya no siguen los valores esperados del modelo existente, se inserta una "ruptura". Los cortes indican que el comportamiento espectral / temporal de un píxel es diferente al del pasado, presumiblemente debido a un cambio en la cobertura del suelo o un cambio en la condición (Fig. 3). El usuario puede ajustar los parámetros para definir la región crítica y el número de observaciones para confirmar un cambio para controlar la sensibilidad de la detección del cambio.

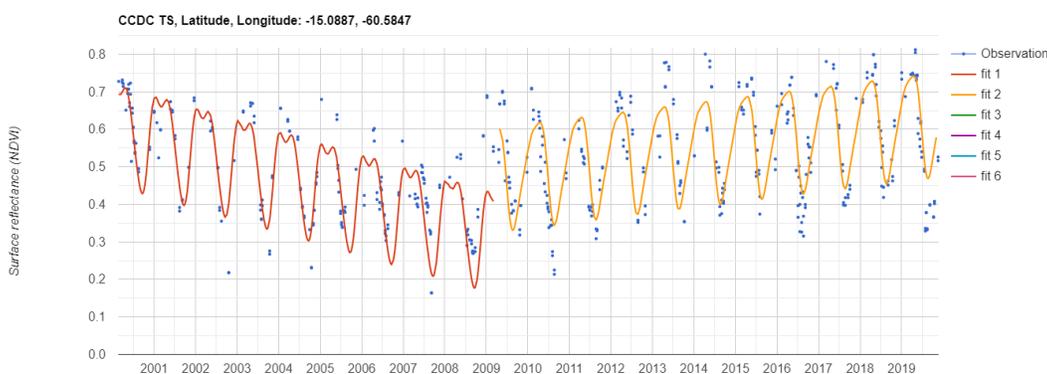


Figura 3. Ejemplo de perfil de NDVI, donde se observa dos segmentos, debido al cambio en la cobertura y un posterior proceso de regeneración.

En la barra lateral derecha denominada "CCD TS controls", se pueden seleccionar las bandas o los índices con que se requieren realizar los análisis. Se sugiere utilizar NDVI o NBR para determinar la regeneración de la vegetación en áreas que fueron impactadas por los incendios. Además, se debe seleccionar la fecha inicial y final de análisis, dejando el resto de los parámetros por defecto.

Para seleccionar la ubicación del área de interés se puede buscar colocando las coordenadas en formato de grado decimal en la opción "Other controls" o seleccionado el lugar al navegar en el mapa. Al hacer un clic en el mapa se genera automáticamente un perfil de con los valores de pixel de las imágenes disponibles y el modelo de regresión armónica, las cuales puede ser descargadas como datos (csv), vectorial (svg) o como imagen (png). Estos datos pueden ayudar a visualizar tendencias del comportamiento fenológico de la vegetación.

## **Script de GEE para extraer perfiles de comportamiento fenológico (expertos)**

Este código fue desarrollado por el Observatorio del Bosque Seco Chiquitano para obtener perfiles de las medianas y los valores ajustados con el modelo armónico del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) y Relación Normalizada de Quemadas (NBR).

Inicialmente se debe cargar en el Assets de GEE, el polígono del área de estudio en formato shapefile, que contenga información de las áreas a evaluar y reemplazar la dirección del Assets en el script. El polígono del CEBST Alta Vista, que fue puesto como ejemplo en los Anexos 3 y 4, contiene información cartográfica diferenciada de las áreas boscosas quemadas (Bosque quema) y no quemadas (Bosque), y del cual se puede hacer diferenciación para los análisis.

El cálculo del número de la muestra para el muestreo aleatorio estratificado puede seguir la metodología en Olofsson *et al.* (2014), que considera la proporción del área mapeada, los valores conjeturados de las precisiones del usuario y la desviación estándar de los estratos. En la cobertura boscosa se propone usar un nivel de confianza del 90% y para no bosque usar un nivel de 95%. Otra metodología válida para el cálculo del número de puntos, es el muestreo de distribución multinomial, propuesta por Congalton & Green (2009) en la que se debe considerar si la proporción de las clases ocupa un área menor o no al 50 % del área de estudio. Para realizar la dispersión de los puntos en GEE se utilizó el algoritmo de randomPoints (<https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-featurecollection-randompoints>), donde se debe especificar la cantidad de puntos, la distancia y la precisión.

El código utiliza la serie temporal completa de Sentinel-2, donde las nuevas observaciones se agregan automáticamente se ajusta un modelo actualizado. También se incluye un filtro para usar imágenes con cobertura menor a 20% de nubes y otro filtro para remover las nubes usando la banda QA60.

El Anexo 3 se diferencia del Anexo 4, únicamente por la selección de las bandas de las imágenes de satélite usadas para generar en el primero el NDVI y en el segundo el NBR. Los análisis y los gráficos generados muestran perfiles de las medianas y los valores ajustados con el modelo armónico para NDVI y NBR. La regresión armónica es una técnica matemática que se utiliza para descomponer una señal estática compleja en una serie de ondas senoidales o coseno individuales, cada una caracterizada por una fase y amplitud específicas (Shumway & Stoffer 2017). Adaptamos los algoritmos de regresión armónica desarrollada por Clinton (2019). La información generada puede ser descargada como datos (csv), vectorial (svg) o como imagen (png). Los datos en formato csv pueden ser procesados en el programa Excel, y de esta manera analizar los umbrales máximos y mínimos, así como las tendencias del comportamiento fenológico de la vegetación.

## **Script de GEE para determinar severidad y proceso de regeneración (expertos)**

Este código fue desarrollado por el Observatorio del Bosque Seco Chiquitano para obtener los índices espectrales NDVI y NBR (Anexo 5), así como también para identificar las diferentes severidades de los incendios propuesto por Key & Benson (2006), desde los niveles Alto repoblamiento hasta Alta severidad, en base al dNBR (Relación Normalizada de Quemadas delta), que como ya mencionó, representa la diferencia entre el NBR previo y posterior al incendio. Las fuentes usadas para desarrollar este script fueron Arellano *et al.* (2017), Bastarrika *et al.* (2011), Bright *et al.* (2019) y UN-SPIDER (2021)

Inicialmente se debe cargar en el Assets de GEE, el polígono del área de estudio en formato shapefile, que contenga información de las áreas a evaluar y reemplazar la dirección del Assets en el script. El polígono que fue puesto como ejemplo en el Anexo 5, contiene información cartográfica diferenciada de las cuatro áreas de estudio evaluadas (Alta Vista, Copaibo, Marfil y Ñembi Guasu).

El código utiliza la serie temporal Sentinel-2, con un filtro para usar imágenes con cobertura menor a 20% de nubes y otro filtro para remover las nubes usando la banda QA60. Para realizar los análisis se debe especificar los rangos de fechas para imágenes anteriores al evento de los incendios, y luego las fechas de las imágenes posterior a estos eventos. El script ha sido programado para generar la categorización de los niveles de severidad. Los resultados obtenidos muestran que los índices de severidad se reducen posterior a los incendios, lo cual evidencia los procesos de regeneración de la vegetación. Sin embargo, es necesario considerar las fechas de análisis entre diferentes estaciones y años, debido a que existen rápidos cambios en el comportamiento fenológico de la vegetación lo cual podría generar sesgos en la interpretación. La opinión de expertos y conocimiento del área de estudio es importante en este proceso.

La información generada para ser descargada como archivo raster (tif), consiste en el NBR preincendio, NBR postincendio, la diferencia NDVI, y el mosaico con los valores de la mediana de las imágenes Sentinel-2 recortadas para el área de estudio.

### Anexo 3. Script para identificar perfiles de las medianas y los valores ajustados con el modelo armónico NDVI en Alta Vista.

```
//Serie temporal NDVI para Sentinel-2
//Autores: Gilka Michme, Oswaldo Maillard & Marcio Flores-Valencia,

var Cobertura =
ee.FeatureCollection("users/gilkaandrechi69/Cobertura_CEBST_Alta_Vista");
var geometry = Cobertura.filterMetadata('Muestreo', 'equals', 'Bosque quema'); //Bosque,
Bosque quema//
Map.addLayer(geometry, {color: "#ae010d"}, 'Areas Quemadas',1);

//var geometry =
ee.FeatureCollection("users/gilkaandrechi69/Laguna_Marfil_Bosque_Quemado");
//Map.addLayer(geometry, {color: "#ae010d"}, "Marfil Bosque Quemado")

// Data
// Create random points in the region.
var randomPoints = ee.FeatureCollection.randomPoints(geometry,50, 100, 5);
// Add to map
Map.centerObject(randomPoints);
Map.addLayer(randomPoints, {}, 'random points');

//Sentinel-2
var S2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
.filterMetadata("CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE", "less_than", 20);

// This field contains UNIX time in milliseconds
var timeField = 'system:time_start';

// Function to cloud mask from the pixel QA60 band of Sentinel-2 Level-1C data.
var maskS2 = function(image) {
// Get the pixel QA60 band.
var QA60 = image.select(['QA60']);
// Return the masked image, scaled to reflectance, without the QA60 bands.
return image.updateMask(QA60.lt(1));
};

// Use this function to add variables for NDVI, time and a constant
// to Sentinel-2 imagery.
var addVariables = function(image) {
// Compute time in fractional years since the epoch.
var date = ee.Date(image.get(timeField));
var years = date.difference(ee.Date('2013-01-01'), 'year');
// Return the image with the added bands.
return image
```

```

// Add an NDVI band.
.addBands(image.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI'))
// Add a time band.
.addBands(ee.Image(years).rename('t'))
.float()
// Add a constant band.
.addBands(ee.Image.constant(1));
};

// Remove clouds, add variables and filter to the area of interest.
var filteredSentinel = S2
.filterBounds(randomPoints)
.map(maskS2)
.map(addVariables);

// Plot a time series of NDVI at a single location.
var S2Chart = ui.Chart.image.series(filteredSentinel.select('NDVI'), randomPoints)
.setChartType('ScatterChart')
.setOptions({
  title: 'Sentinel-2 NDVI time series at ROI',
  trendlines: {0: {
    color: 'CC0000'
  }},
  lineWidth: 1,
  pointSize: 3,
});
print(S2Chart);

// List of the independent variable names
var independents = ee.List(['constant', 't']);

// Name of the dependent variable.
var dependent = ee.String('NDVI');

// Compute a linear trend. This will have two bands: 'residuals' and
// a 2x1 band called coefficients (columns are for dependent variables).
var trend = filteredSentinel.select(independents.add(dependent))
.reduce(ee.Reducer.linearRegression(independents.length(), 1));
// Map.addLayer(trend, {}, 'trend array image');

// Flatten the coefficients into a 2-band image
var coefficients = trend.select('coefficients')
.arrayProject([0])
.arrayFlatten([independents]);
// Compute a de-trended series.
var detrended = filteredSentinel.map(function(image) {
  return image.select(dependent).subtract(

```

```

        image.select(independents).multiply(coefficients).reduce('sum'))
        .rename(dependent)
        .copyProperties(image, [timeField]);
});

// Plot the detrended results.
var detrendedChart = ui.Chart.image.series(detrended, randomPoints, null, 500)
    .setOptions({
        title: 'Detrended Sentinel-2 time series at ROI',
        lineWidth: 1,
        pointSize: 3,
    });
print(detrendedChart);

// Use these independent variables in the harmonic regression.
var harmonicIndependents = ee.List(['constant', 't', 'cos', 'sin']);

// Add harmonic terms as new image bands.
var harmonicSentinel = filteredSentinel.map(function(image) {
    var timeRadians = image.select('t').multiply(2 * Math.PI);
    return image
        .addBands(timeRadians.cos().rename('cos'))
        .addBands(timeRadians.sin().rename('sin'));
});

var harmonicTrend = harmonicSentinel
    .select(harmonicIndependents.add(dependent))
    // The output of this reducer is a 4x1 array image.
    .reduce(ee.Reducer.linearRegression({
        numX: harmonicIndependents.length(),
        numY: 1
    }));

// Turn the array image into a multi-band image of coefficients.
var harmonicTrendCoefficients = harmonicTrend.select('coefficients')
    .arrayProject([0])
    .arrayFlatten([harmonicIndependents]);

// Compute fitted values.
var fittedHarmonic = harmonicSentinel.map(function(image) {
    return image.addBands(
        image.select(harmonicIndependents)
            .multiply(harmonicTrendCoefficients)
            .reduce('sum')
            .rename('fitted'));
});

```

```
// Plot the fitted model and the original data at the ROI.  
print(ui.Chart.image.series(  
  fittedHarmonic.select(['fitted','NDVI']), randomPoints, ee.Reducer.mean(), 500)  
  .setSeriesNames(['NDVI', 'NDVI ajustado'])  
  .setOptions({  
    title: 'Bosque no Quemado Alta Vista',  
    hAxis: {title: 'Mes/Año'},  
    vAxis: {title: 'NDVI'},  
    lineWidth: 0,  
    pointSize: 3,  
  }));
```

```
Export.table.toDrive({  
  collection: randomPoints,  
  description: 'PuntosCopaibo_bosque',  
  folder: 'Puntos_Aleatorios',  
  fileFormat: 'SHP'  
});
```

#### **Anexo 4. Script para identificar perfiles de las medianas y los valores ajustados con el modelo armónico NBR en Alta Vista.**

```
//Serie temporal NBR para Sentinel-2
//Autores: Gilka Michme, Oswaldo Maillard & Marcio Flores-Valencia,

var Cobertura =
ee.FeatureCollection("users/gilkaandrechi69/Cobertura_CEBST_Alta_Vista");
var geometry = Cobertura.filterMetadata('Muestreo', 'equals', 'Bosque quema'); //Bosque,
Bosque quema//
Map.addLayer(geometry, {color: "#ae010d"}, 'Areas Quemadas',1);

//var geometry =
ee.FeatureCollection("users/gilkaandrechi69/Laguna_Marfil_Bosque_Quemado");
//Map.addLayer(geometry, {color: "#ae010d"}, "Marfil Bosque Quemado")

// Data
// Create random points in the region.
var randomPoints = ee.FeatureCollection.randomPoints(geometry, 50, 100, 5);
// Add to map
Map.centerObject(randomPoints);
Map.addLayer(randomPoints, {}, 'random points');

//Sentinel-2
var S2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
.filterMetadata("CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE", "less_than", 20);

// This field contains UNIX time in milliseconds
var timeField = 'system:time_start';

// Function to cloud mask from the pixel QA60 band of Sentinel-2 Level-1C data.
var maskS2 = function(image) {
// Get the pixel QA60 band.
var QA60 = image.select(['QA60']);
// Return the masked image, scaled to reflectance, without the QA60 bands.
return image.updateMask(QA60.lt(1));
};

// Use this function to add variables for NDVI, time and a constant
// to Sentinel-2 imagery.
var addVariables = function(image) {
// Compute time in fractional years since the epoch.
var date = ee.Date(image.get(timeField));
var years = date.difference(ee.Date('2013-01-01'), 'year');
// Return the image with the added bands.
return image
```

```

// Add an NDVI band.
.addBands(image.normalizedDifference(['B8A', 'B12']).rename('NBR'))
// Add a time band.
.addBands(ee.Image(years).rename('t'))
.float()
// Add a constant band.
.addBands(ee.Image.constant(1));
};

// Remove clouds, add variables and filter to the area of interest.
var filteredSentinel = S2
.filterBounds(randomPoints)
.map(maskS2)
.map(addVariables);

// Plot a time series of NDVI at a single location.
var S2Chart = ui.Chart.image.series(filteredSentinel.select('NBR'), randomPoints)
.setChartType('ScatterChart')
.setOptions({
  title: 'Sentinel-2 NBR time series at ROI',
  trendlines: {0: {
    color: 'CC0000'
  }},
  lineWidth: 1,
  pointSize: 3,
});
print(S2Chart);

// List of the independent variable names
var independents = ee.List(['constant', 't']);

// Name of the dependent variable.
var dependent = ee.String('NBR');

// Compute a linear trend. This will have two bands: 'residuals' and
// a 2x1 band called coefficients (columns are for dependent variables).
var trend = filteredSentinel.select(independents.add(dependent))
.reduce(ee.Reducer.linearRegression(independents.length(), 1));
// Map.addLayer(trend, {}, 'trend array image');

// Flatten the coefficients into a 2-band image
var coefficients = trend.select('coefficients')
.arrayProject([0])
.arrayFlatten([independents]);
// Compute a de-trended series.
var detrended = filteredSentinel.map(function(image) {
  return image.select(dependent).subtract(

```

```

        image.select(independents).multiply(coefficients).reduce('sum'))
        .rename(dependent)
        .copyProperties(image, [timeField]);
});

// Plot the detrended results.
var detrendedChart = ui.Chart.image.series(detrended, randomPoints, null, 500)
    .setOptions({
        title: 'Detrended Sentinel-2 time series at ROI',
        lineWidth: 1,
        pointSize: 3,
    });
print(detrendedChart);

// Use these independent variables in the harmonic regression.
var harmonicIndependents = ee.List(['constant', 't', 'cos', 'sin']);

// Add harmonic terms as new image bands.
var harmonicSentinel = filteredSentinel.map(function(image) {
    var timeRadians = image.select('t').multiply(2 * Math.PI);
    return image
        .addBands(timeRadians.cos().rename('cos'))
        .addBands(timeRadians.sin().rename('sin'));
});

var harmonicTrend = harmonicSentinel
    .select(harmonicIndependents.add(dependent))
    // The output of this reducer is a 4x1 array image.
    .reduce(ee.Reducer.linearRegression({
        numX: harmonicIndependents.length(),
        numY: 1
    }));

// Turn the array image into a multi-band image of coefficients.
var harmonicTrendCoefficients = harmonicTrend.select('coefficients')
    .arrayProject([0])
    .arrayFlatten([harmonicIndependents]);

// Compute fitted values.
var fittedHarmonic = harmonicSentinel.map(function(image) {
    return image.addBands(
        image.select(harmonicIndependents)
            .multiply(harmonicTrendCoefficients)
            .reduce('sum')
            .rename('fitted'));
});

```

```
// Plot the fitted model and the original data at the ROI.  
print(ui.Chart.image.series(  
  fittedHarmonic.select(['fitted','NBR']), randomPoints, ee.Reducer.mean(), 500)  
  .setSeriesNames(['NBR', 'NBR ajustado'])  
  .setOptions({  
    title: 'Bosque no quemado Alta Vista',  
    hAxis: {title: 'Mes/Año'},  
    vAxis: {title: 'NBR'},  
    lineWidth: 0,  
    pointSize: 3,  
  }));
```

```
Export.table.toDrive({  
  collection: randomPoints,  
  description: 'PuntosAltaVista_Bosque',  
  folder: 'Puntos_Aleatorios',  
  fileFormat: 'SHP'  
});
```

## Anexo 5. Script para identificar niveles de severidad de las áreas impactadas por los incendios en Alta Vista.

```
//Análisis de la severidad y regeneración en áreas impactadas por los incendios forestales
//Autores: Marcio Flores-Valencia, Oswaldo Maillard & Gilka Michme
```

```
var geometry =
ee.FeatureCollection("users/Marcio_FloresValencia/Sitios_Componente_3_buff5k");
Map.addLayer(geometry, {}, 'Sitios Comp3',1);
var Mask = geometry.filterMetadata('Sitios', 'equals', 'AltaVista');//Sitios (Copaibo,
LagunaMarfil, ÑembiGuasu y AltaVista).
```

```
//-----Funcion de mascara de nubes Imagen SENTINEL 2 -----
```

```
function MascaraNubesS(image) {
  var qa = image.select('QA60');
  var RecorteNubesMascaraS = 1 << 10;
  var RecorteCirrosMascaraS = 1 << 11;
  var MascaraS = qa.bitwiseAnd(RecorteNubesMascaraS).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(RecorteCirrosMascaraS).eq(0));
  return image.updateMask(MascaraS);}

```

```
// Function to cloud mask from the pixel QA60 band of Sentinel-2 Level-1C data.
```

```
var MascaraNubesS = function(image) {
  // Get the pixel QA60 band.
  var QA60 = image.select(['QA60']);
  // Return the masked image, scaled to reflectance, without the QA60 bands.
  return image.updateMask(QA60.lt(1));
};
```

```
//----- Imagen SENTINEL 2 ----- fechas disponibles ('2015-07-01' -
actualidad)-----
```

```
// Seleccion de las imagenes anteriores a los incendios ocurridos
```

```
var PreIncendio = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR') // Mejor respuesta visual
con productos de nivel 2A frente 1C.
```

```
.filterDate('2019-07-01', '2019-07-05')
.filterBounds (Mask)
.filterMetadata ('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'Less_Than', 20)
.map(MascaraNubesS);
```

```
var medianPreIncendio = PreIncendio.reduce(ee.Reducer.median()); //Mejor respuesta
visual frente a .mosaic()
```

```
var S2ClipPreIncendio = medianPreIncendio.clip (Mask);
```

```
// Seleccion de las imagenes posterior a los incendios
```

```

var PostIncendio = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR') // Mejor respuesta visual
con productos de nivel 2A frente 1C
  .filterDate('2019-10-01', '2019-10-30')
  .filterBounds (Mask)
  .filterMetadata ('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'Less_Than', 60)
  .map(MascaraNubesS);
var mosaicPostIncendio = PostIncendio.mosaic(); // Mejor respuesta visual frente a
.median()
var S2ClipPostIncendio = mosaicPostIncendio.clip (Mask);

var FalsoColor = {min: 500, max: 3000, gamma: 1.0,
  bands: ['B11_median', 'B8_median', 'B4_median'],}; //Composición RGB 11,8,2
(SWIR,NIR,BLUE)
var FalsoColor2 = {min: 500.0, max: 3000.0, gamma: 1.0,
  bands: ['B11', 'B8', 'B4'],}; //Composición RGB 11,8,2 (SWIR,NIR,BLUE)

// Esto genera una lista JSON de las imágenes (y sus metadatos) según los filtros usados
print(PreIncendio,"Lista de Imagenes Pre-Incendio")
print(PostIncendio,"Lista Imagenes Post-Incendio")

//----- INDICE NBR -----
// Calculo del NBR Post-Incendio Basado en  $NBR=(NIR-SWIR)/(NIR+SWIR)$ 
var NBRPostIncendio= S2ClipPostIncendio.normalizedDifference (['B8','B12']);

// Calculo del NBR Pre-Incendio Basado en  $NBR=(NIR-SWIR)/(NIR+SWIR)$ 
var NBRPreIncendio= S2ClipPreIncendio.normalizedDifference
(['B8_median','B12_median']);

// Calculo del Indice dNBR (Indice de Severidad) Diferencia entre momentos temporales
var IndiceSeveridad = NBRPreIncendio.subtract(NBRPostIncendio);

var SimbolPreNBR = {max: 0.4,min: -0.1,
  palette: ['#7F0010', '#D99143', '#C04529', '#E02E20', '#EC6521', '#F6D53B']};
var SimbolPostNBR = {max: 0.4, min: -0.1,
  palette: ['#7F0010', '#D99143', '#C04529', '#E02E20', '#EC6521', '#F6D53B']};
var SimbolSeveridad = {max: 1.0, min: -0.4,
  palette: ['011301', '011D01', '012E01', '023B01', '004C00', '056201', '207401', '3E8601',
  '529400', '74A901', '99B718', 'FCD163', 'F1B555', 'DF923D', 'CE7E45', '66A000']};

// Escalar el producto a los estándares del USGS (FIREMON)
var dNBR = IndiceSeveridad.multiply(1000);
//Map.addLayer (dNBR, SimbolSeveridad, 'dNBR_FIREMON', 0);

//----- INDICE NDVI -----

```

```
var NDVIPostIncendio= S2ClipPostIncendio.normalizedDifference(['B8','B4']); // Basado
en NDVI=(NIR-RED)/(NIR+RED)
```

```
var NDVIPreIncendio= S2ClipPreIncendio.normalizedDifference
(['B8_median','B4_median']); // Basado en NDVI=(NIR-RED)/(NIR+RED)
```

```
var SimbolNDVI= {max: 1.0, min: 0,
  palette: ['CE7E45', 'DF923D', 'F1B555', 'FCD163', '99B718', '74A901', '66A000',
'529400', '3E8601',
  '207401', '056201', '004C00', '023B01', '012E01', '011D01', '011301']};
```

```
var ndviDifference = NDVIPostIncendio.subtract(NDVIPreIncendio);
```

```
// Desplegar el resultado de la diferencia.
```

```
//Map.centerObject(ndvi1, 9);
```

```
Map.addLayer(ndviDifference, { min:-0.3, max: 0.3, palette: [ 'FF0000',
'FFFF00', '006400']}, "Cambios de NDVI de 2019 a 2020, Marfil",0 );
```

```
//----- Agregar las imagenes al mapa SENTINEL PostIncendio-PreIncendio -----
-----
```

```
Map.addLayer(S2ClipPostIncendio, FalsoColor2, 'Sentinel 2 - PostIncendio', 1); // imagen
postincendio
```

```
Map.addLayer(S2ClipPreIncendio, FalsoColor,'Sentinel 2 - PreIncendio', 1);// imagen
preincendio
```

```
//Map.addLayer (NDVIPostIncendio, SimbolNDVI, 'NDVI PostIncendio', 0);
```

```
//Map.addLayer (NDVIPreIncendio, SimbolNDVI, 'NDVI PreIncendio', 0);
```

```
//Map.addLayer (NBRPostIncendio, SimbolPostNBR, 'NBR PostIncendio', 0);
```

```
//Map.addLayer (NBRPreIncendio, SimbolPreNBR, 'NBR PreIncendio', 0);
```

```
Map.addLayer (IndiceSeveridad, SimbolSeveridad, 'Índice severidad de incendio', 0);
```

```
//----- Producto de severidad del incendio - Clasificación -----
```

```
// Define un estilo SLD de intervalos discretos para aplicar a la imagen (paleta de color).
```

```
var sld_intervals =
```

```
'<RasterSymbolizer>' +
```

```
'<ColorMap type="intervals" extended="false" >' +
```

```
'<ColorMapEntry color="#ffffff" quantity="-500" label="-500"/>' +
```

```
'<ColorMapEntry color="#7a8737" quantity="-250" label="-250" />' +
```

```
'<ColorMapEntry color="#acbe4d" quantity="-100" label="-100" />' +
```

```
'<ColorMapEntry color="#0ae042" quantity="100" label="100" />' +
```

```
'<ColorMapEntry color="#ff70b" quantity="270" label="270" />' +
```

```
'<ColorMapEntry color="#ffaf38" quantity="440" label="440" />' +
```

```
'<ColorMapEntry color="#ff641b" quantity="660" label="660" />' +
```

```
'<ColorMapEntry color="#FF0000" quantity="2000" label="2000" />' +
```

```
'</ColorMap>' +
```

```
'</RasterSymbolizer>';
```

```
// Agrega la imagen al mapa utilizando la rampa de color como los intervalo definidos.  
Map.addLayer(dNBR.sldStyle(sld_intervals), {}, 'dNBR clasificado', 0);
```

```
// Separa el resultado en 8 clases de severidad del incendio.  
var thresholds = ee.Image([-1000, -251, -101, 99, 269, 439, 659, 2000]);  
var classified = dNBR.lt(thresholds).reduce('sum').toInt();
```

```
//=====
```

```
// AGREGAR UNA LEYENDA
```

```
// establece la posición del recuadro de leyenda.
```

```
var legend = ui.Panel({  
  style: {  
    position: 'bottom-left',  
    padding: '8px 15px'  
  }});
```

```
// Crea un título de leyenda.
```

```
var legendTitle = ui.Label({  
  value: 'Clases del dNBR',  
  style: {fontWeight: 'bold',  
    fontSize: '18px',  
    margin: '0 0 4px 0',  
    padding: '0'  
  }});
```

```
// Agrega el título al recuadro.
```

```
legend.add(legendTitle);
```

```
// Crea y estiliza 1 fila de la leyenda.
```

```
var makeRow = function(color, name) {
```

```
  // Crea la etiqueta que en realidad es el cuadro de color.
```

```
  var colorBox = ui.Label({  
    style: {  
      backgroundColor: '#' + color,  
      // Usa (padding) para rellenar y dar la altura y el ancho de la caja.  
      padding: '8px',  
      margin: '0 0 4px 0'  
    }});
```

```
  // Crea la etiqueta llena con el texto descriptivo.
```

```
  var description = ui.Label({  
    value: name,  
    style: {margin: '0 0 4px 6px'}
```

```

});

// devuelve el panel
return ui.Panel({
  widgets: [colorBox, description],
  layout: ui.Panel.Layout.Flow('horizontal')
}));

// Paleta de colores
var palette =['7a8737', 'acbe4d', '0ae042', 'fff70b', 'ffaf38', 'ff641b', 'FF0000', 'ffffff'];

// Nombre de la leyenda
var names = ['Nuevo rebrote, Alto','Nuevo rebrote, Bajo','No quemado', 'Baja Severidad',
'Moderda-Baja Severidad', 'Moderada-Alta Severidad', 'Alta Severidad', 'NA'];

// Agrega color y nombres
for (var i = 0; i < 8; i++) {
  legend.add(makeRow(palette[i], names[i]));
}

// Agrega la leyenda al mapa (también se puede imprimir la leyenda en la consola)
Map.add(legend);

//=====
=====

Map.centerObject(Mask);

// ----- exportar las imagenes -----

Export.image.toDrive({
  image: IndiceSeveridad,
  folder: 'SEVERIDAD',
  description: 'NBR_AltaVista_02jul2019_20oct2019_10m',
  scale: 10,
  maxPixels: 1e13,
  region: Mask,
  crs: "EPSG:4326"
});

Export.image.toDrive({
  image: classified,
  folder: 'SEVERIDAD',
  description: 'dNBR_Classified_AltaVista_02jul2019_20oct2019_10m',
  scale: 10,
  maxPixels: 1e13,
  region: Mask,

```

```
crs: "EPSG:4326"  
});
```

```
Export.image.toDrive({  
  image: ndviDifference,  
  folder: 'SEVERIDAD',  
  description: 'ndviDifference_AltaVista_02jul2019_20oct2019_10m',  
  scale: 10,  
  maxPixels: 1e13,  
  region: Mask,  
  crs: "EPSG:4326"  
});
```

```
Export.image.toDrive({  
  image: S2ClipPostIncendio.select("B11", "B8", "B4"),  
  folder: 'SEVERIDAD',  
  description: 'S2_PostIncendio_AltaVista_20oct2019_10m',  
  scale: 10,  
  maxPixels: 1e13,  
  region: Mask,  
  crs: "EPSG:4326"  
});
```

```
Export.image.toDrive({  
  image: S2ClipPreIncendio.select("B11_median", "B8_median", "B4_median"),  
  folder: 'SEVERIDAD',  
  description: 'S2_PreIncendio_AltaVista_02jul2019_10m',  
  scale: 10,  
  maxPixels: 1e13,  
  region: Mask,  
  crs: "EPSG:4326"  
});
```

## REFERENCIAS

- Anívarro, R., H. Azurduy, O. Maillard & A. Markos. 2019. Diagnóstico por teledetección de áreas quemadas en la Chiquitania. Informe técnico del Observatorio Bosque Seco Chiquitano, Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano, Santa Cruz, 70 p.
- Arellano, S., J.A. Vega, F. Rodríguez y Silva, C. Fernández, & D. Vega-Nieva. 2017. Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013. *Revista de teledetección* 49 (Número especial): 49-61.
- Arévalo, P., E.L. Bullock, C.E. Woodcock & P. Olofsson. 2020. A Suite of Tools for Continuous Land Change Monitoring in Google Earth Engine. *Front. Clim.* 2:576740. doi: 10.3389/fclim.2020.576740
- Arellano, S.; J. Vega, F. Rodríguez Y Silva, C. Fernández, D. Vega-Nieva, J. Álvarez-González, A. Ruiz-González. 2017. Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013. *Revista de Teledetección.* (49):49-61. doi:10.4995/raet.2017.7137
- Bastarrika, A., E. Chuvieco & M.P. Martín. 2011. Mapping burned area from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment*, 115: 1003-1012.
- Bright, B.C., A.T. Hudak, R. E. Kennedy, J.D. Braaten & A. Henareh Khalyani. 2019. Examining post-fire vegetation recovery with Landsat time series analysis in three western North American forest types. *Fire Ecology*15: 8. <https://doi.org/10.1186/s42408-018-0021-9>
- Clinton, N. 2019. Lab 6: Time series analysis. In *Introductory Remote Sensing Code Labs; Geospatial Analysis Lab*, University of San Francisco: San Francisco, CA, USA, 2019. <https://docs.google.com/document/d/1mNIRB90jwLuASO1JYas1kuOXCLbOoy1Z4NIV1qIXM10/edit#>
- Congalton, R.G. & K. Green. 2009. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Second edition, CRC Press.
- Coppin, P., I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys, & E. Lambin. 2004. Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: A review. *Int. J. Remote Sens.*, 25: 1565–1596.
- Flores-Valencia, M., Maillard, O. 2021. Detección y cuantificación de los incendios forestales 2020: un análisis de la afectación en municipios, Tierras de Producción Forestal Permanente (TPFP) y áreas protegidas del departamento de Santa Cruz, Bolivia. Informe técnico del Observatorio Bosque Seco Chiquitano, Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano, Santa Cruz, Bolivia, 68 pag.
- Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, & R. Moore. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* 202: 18–27.
- Hansen, M.C., P.V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S.A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S.V. Stehman, S.J. Goetz, T.R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C.O. Justice & J.R.G. Townshend. 2013. High-resolution global maps of 21st – century forest cover change. *Science* 342:850–853. *International Journal of Advances in Engineering & Technology* 7(4): 1161–1169.

- Key, C.H. & N.C. Benson. 2006. Landscape assessment: ground measure of severity, the composite burn index; and remote sensing of severity, the normalized burn ratio. pp. 219-273. En: Lutes, D.C., R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson, S. Sutherland & L.J. Gangi (eds.) Fire Effects Monitoring and Inventory System. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden.
- Kumar, L. & O. Mutanga. 2018. Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential. *Remote Sens.* 10: 1509.
- Langner, A., J. Miettinen, M. Kukkonen, C. Vancutsem, D. Simonetti, G. Vieilledent, A. Verhegghen, J. Gallego, & H.J. Stibig. 2018. Towards operational monitoring of forest canopy disturbance in evergreen rain forests: A test case in continental Southeast Asia.
- Lizundia-Loiola, J., M.L. Pettinari & E. Chuvieco. 2020. Temporal Anomalies in Burned Area Trends: Satellite Estimations of the Amazonian 2019 Fire Crisis. *Remote Sensing* 12(1): 151 *Remote Sens.* 10: 544.
- Maillard, O. 2020. Los bosques de Bolivia y sus funciones ambientales. *Hábitat* 90: 6-17.
- Nyland, K.E., G.E. Gunn, N.I. Shiklomanov, R.N. Engstrom, & D.A. Streletskiy. 2018. Land cover change in the lower Yenisei River using dense stacking of landsat imagery in Google Earth Engine. *Remote Sens.* 10: 1226.
- Olofsson, P. G. M. Foody, M. Herold, S.V. Stehman, C.E. Woodcock, M.A. Wulder. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment* 148: 42–57.
- Parente, L. & L. Ferreira. 2018. Assessing the spatial and occupation dynamics of the Brazilian pasturelands based on the automated classification of MODIS images from 2000 to 2016. *Remote Sens.* 10: 606.
- Paruelo, J.M., H.E. Epstein, W.K. Lauenroth & I.C. Burke. 1997. ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the US. *Ecology* 78:953–958.
- Shumway, R.H. & Stoffer, D.S. 2017. *Time Series Analysis and its Applications*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland.
- Steltzer, H. & J.M. Welker. 2006. Modeling the effect of photosynthetic vegetation properties on the NDVI-LAI relationship. *Ecology* 87:2765–2772
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.
- UN-SPIDER. 2021. <https://github.com/UN-SPIDER/burn-severity-mapping-EO>