

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**PROYECTO DE GRADO**

**DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SEVERIDAD PRODUCIDO EN LOS  
SUELOS POR INCENDIOS FORESTALES EN LA ZONA DE LA  
AMAZONÍA BOLIVIANA A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE  
TELEDETECCIÓN SATELITAL**

**“CASO SAN IGNACIO DE VELASCO”**

**POSTULANTE: ALEX SALCEDO TICONA**

**DOCENTE: ING. JOSÉ CAMPERO BUSTILLOS**

**TUTOR: ING. MIGUEL ÁNGEL PÉREZ BUSTILLOS**

**LA PAZ – BOLIVIA**

**2024**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

# **PROYECTO DE GRADO**

DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SEVERIDAD PRODUCIDO EN LOS  
SUELOS POR INCENDIOS FORESTALES EN LA ZONA DE LA  
AMAZONÍA BOLIVIANA A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE  
TELEDETECCIÓN SATELITAL  
“CASO SAN IGNACIO DE VELASCO”

Presentado por:

Alex Salcedo Ticona

Trabajo de conclusión  
para la obtención de grado de  
licenciatura en:

Ingeniería Electrónica

La Paz – Bolivia

2024

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera comenzar expresando mi más profundo agradecimiento a mi querida Universidad Mayor de San Andrés por ser el epicentro de mi trayectoria académica. Esta institución no solo me proporcionó una educación de calidad, sino que también creó un entorno enriquecedor que ha sido fundamental para mi crecimiento intelectual.

Al Ingeniero José Campero Bustillos docente de diferentes materias le expreso mi reconocimiento por su apoyo constante y por su calidad de enseñanza que ha hecho de mi experiencia universitaria algo inolvidable. Agradezco al Ingeniero Miguel Ángel Pérez Bustillos por ser mi guía y mentor a lo largo de este proceso. Su experiencia, paciencia y compromiso fueron fundamentales para la culminación del presente proyecto.

Mis sinceros agradecimientos se extienden a todos mis docentes, cuyas enseñanzas y orientación han contribuido significativamente a mi formación académica.

Finalmente quiero dedicar este espacio especial para expresar mi más profundo agradecimiento a dos personas que han sido pilares inquebrantables en mi vida: mi amada madre y mi querido hermano.

A ti, mamá, agradezco por tu amor incondicional, tu apoyo constante y tus palabras alentadoras. Tu sacrificio y dedicación han sido la luz que iluminó mi camino a lo largo de esta travesía académica. A mi querido hermano, quien más que hermano ha sido una figura paterna, tu respaldo inquebrantable y tu ánimo constante han sido un estímulo valioso en cada paso de este proceso. Saber que contaba con tu apoyo me dio la fuerza necesaria para superar obstáculos y perseguir mis metas.

Este proyecto no solo es un logro personal, sino también un tributo a la confianza que depositaron en mí. Gracias por ser mi refugio y por creer en mis capacidades. Este éxito lleva impreso su amor y apoyo, y por eso, este logro es tanto de ustedes como mío.

Con todo mi amor y agradecimiento, Alex Salcedo Ticona.

## RESUMEN

Este proyecto se centra en evaluar la degradación del suelo tras incendios forestales en el Municipio de San Ignacio de Velasco, utilizando imágenes satelitales Landsat 8. Se aplican diversas correcciones y conversiones a las imágenes para mejorar su precisión, sin embargo, se encuentra que los índices estándar no son completamente adecuados para el área específica de estudio. Por lo tanto, se desarrolla un nuevo modelo basado en el Índice Compuesto de Quema propuesto por Key y Benson. Este modelo se valida mediante regresiones, encontrando que el índice Difference Normalized Burn Ratio presenta la mejor correlación cúbica. A partir de esto, se categorizan los niveles de severidad del incendio en cuatro niveles: Nula, Baja, Moderada y Alta; además, se aplica este modelo a la imagen satelital del municipio, lo que permite visualizar y medir las áreas afectadas por el incendio y determinar la extensión de cada nivel de severidad. La comparación con datos de campo confirma la fiabilidad del modelo, demostrando una mejora significativa respecto al índice genérico Difference Normalized Burn Ratio. Este enfoque ofrece una herramienta valiosa para estudiar la degradación del suelo después de incendios forestales, proporcionando una comprensión más precisa y detallada de la severidad de los mismos en el área de estudio.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	4
1.3. Justificación. ....	7
1.3.1. Justificación Académica.....	7
1.3.2. Justificación Económica.....	7
1.3.3. Justificación Social.....	8
1.4. Objetivo general.....	8
1.5. Objetivos secundarios.....	8
1.6. Límites del proyecto.....	9
1.7. Alcances del proyecto.....	10
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Definición de Teledetección.....	11
2.2. Tipos de Teledetección.....	11
2.3. Componentes de un sistema de Teledetección.....	12
2.4. Importancia de la radiación electromagnética en Teledetección.....	14
2.5. El espectro electromagnético.....	17
2.5.1. Espectro visible.....	18
2.5.2. Infrarrojo cercano (IRC) o Near InfraRed (NIR).....	19

2.5.3.	Infrarrojo lejano o térmico (IRT) o Long-wavelength Infrared. ....	19
2.5.4.	Micro-Ondas .....	19
2.6.	Interacción entre la radiación y los objetos.....	20
2.7.	Índice compuesto de área quemada (Composite Burned Index -CBI-).....	22
2.7.1.	Metodología de evaluación del (CBI). ....	22
2.7.2.	Instrucciones para el llenado de planilla CBI (Método Key and Benson). ....	23
2.7.3.	Severidad de los incendios forestales. ....	27
2.8.	Definición de algoritmo. ....	29
2.8.1.	Definición de Algoritmo en Teledetección. ....	30
2.9.	Procesamiento digital de imágenes satelitales. ....	30
2.9.1.	Operaciones con imágenes digitales:.....	32
2.9.2.	Correcciones de las imágenes del satélite.....	32
2.9.3.	Correcciones extras aplicadas en el procesamiento de imágenes. ....	36
2.10.	Tipos de satélites utilizados en Teledetección. ....	38
2.10.1.	Características orbitales de los satélites de Teledetección. ....	38
2.10.2.	Resolución de los sensores remotos. ....	39
2.10.3.	Satélites de Teledetección y sus características.....	41
2.11.	Rango histórico del Satélite Landsat.....	51
2.11.1.	Cronología de los Satélites Landsat a lo largo de los años.....	52
3.	INGENIERÍA DEL PROYECTO.....	70

3.1.	Estadística de incendios en el Municipio de San Ignacio de Velasco. ....	70
3.1.1.	Análisis de regresión temporal - estacional. ....	72
3.1.2.	Análisis de la temperatura versus el porcentaje de humedad. ....	81
3.2.	Ingeniería de proyecto para el procesamiento de imágenes. ....	82
3.3.	Selección de área de estudio y satélite a utilizar. ....	86
3.3.1.	Aspectos para la selección del área de estudio. ....	86
3.3.2.	Factores tomados en cuenta para la selección del satélite Landsat 8. ....	87
3.4.	Descarga de imágenes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). ....	88
3.4.1.	Pasos para la descarga de imágenes Landsat 8 del USGS. ....	88
3.4.2.	Corrección del metadato. ....	92
3.5.	Calibración radiométrica. ....	93
3.6.	Calibración geometría. ....	95
3.7.	Conversión a reflectancia de superficie y aplicación. ....	96
3.7.1.	Corrección a reflectancia de superficie por el método Flaash. ....	96
3.7.2.	Normalización en la escala de reflectancia de superficie. ....	100
3.8.	Generación del mosaico Pre y Post incendio en Software R Studio. ....	102
3.9.	Trabajo de campo para obtener el CBI (Compost Burn Index). ....	109
3.9.1.	Medición de la severidad en el terreno mediante aspectos visuales. ....	110
3.9.2.	Procesamiento de los datos de campo CBI. ....	118
3.10.	Análisis de índices para severidad. ....	119

3.10.1.	Cálculo del índice Normalized Burn Ratio (NBR).....	119
3.10.2.	Cálculo del índice Difference Normalized Burn Ratio (DNBR).....	123
3.10.3.	Cálculo del índice Relativized Burn Ratio (RBR).....	125
3.10.4.	Cálculo del índice Relative Difference Normalized Burn Ratio (RdNBR).....	127
3.11.	Comparación de índices de severidad con índice CBI.....	128
3.11.1.	Comparación índice DNBR con índice CBI.....	128
3.12.	Muestreo y observación de los datos.....	130
3.13.	Aplicación de diferentes regresiones y análisis de parámetros estadísticos.....	134
3.13.1.	Aplicación de regresiones a las muestras de entrenamiento.....	135
3.14.	Comparación de las mejores regresiones y selección del mejor modelo. ....	141
3.15.	Aplicación de las muestras de testeo sobre el modelo seleccionado.....	142
3.16.	Verificación de parámetros y validación del modelo.....	143
4.	APLICACIÓN DEL MODELO Y RESULTADOS.....	145
4.1.	Obtención del mapa de severidad.....	145
4.2.	Resultados sobre el área de estudio. ....	149
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	152
5.1.	Conclusiones.....	152
5.2.	Recomendaciones.....	154
6.	ANEXOS.....	155
6.1.	Análisis de temperatura.....	155

6.2.	Análisis de humedad.....	166
6.3.	Análisis de presión.....	177
6.4.	Mosaico Pre incendio.....	188
6.5.	Mosaico Post incendio.....	189
6.6.	Análisis de índices para severidad.....	191
6.6.1.	Índice DNBR.....	191
6.6.2.	Índice RBR.....	193
6.6.3.	Índice RDNBR.....	194
6.7.	Comparación de índices de severidad con índice CBI.....	195
6.8.	Aplicación del modelo y resultados.....	199

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Cantidad de bosques primarios perdidos en Bolivia en los últimos 21 años.....	5
Ilustración 1.2. Brotes de incendios forestales Sud América 2021 .....	6
Ilustración 2.1 Tipos de Teledetección (Pasiva y Activa) .....	12
Ilustración 2.2 Esquema de un sistema de Teledetección. ....	13
Ilustración 2.3 Esquema de propagación de onda electromagnética. ....	15
Ilustración 2.4 El espectro electromagnético.....	18
Ilustración 2.5 Comportamiento de la radiación en los diferentes objetos de la superficie. ....	21
Ilustración 2.6 Categorización de los niveles de severidad. ....	23
Ilustración 2.7 Diagrama de correcciones en la imagen satelital. ....	33
Ilustración 2.8 Factores en las distorsiones geométricas.....	33
Ilustración 2.9 Corrección radiométrica de un pixel. ....	34
Ilustración 2.10 Efectos de la atmosfera y proceso de corrección atmosférica. ....	35
Ilustración 2.11 Imágenes del sensor POLDER tomadas sobre la zona de Barrax (Albacete). Composición en falso color RGB.....	36
Ilustración 2.12 Órbita GEOESTACIONARIA y orbita CUASI POLAR.....	39
Ilustración 2.13 Imágenes del satélite Landsat 1 (izquierda) de 1972 e imágenes del satélite Landsat 8 (derecha) de 2016 del Valle del Silicio en el norte de California.....	52
Ilustración 2.14 Cronología de los Satélites Landsat a lo largo de los años.....	53
Ilustración 2.15 El satélite Landsat 1 (ERTS-1).....	54
Ilustración 2.16 La primera imagen de luz de Landsat 2 muestra una porción de Alberta, Canadá .....	56
Ilustración 2.17 Imagen de la primera luz de Landsat 3 del norte de California.....	57

Ilustración 2.18 Imagen de primera luz de Landsat 4 sobre el oeste del lago Erie, 25 de julio de 1982. ....	59
Ilustración 2.19 Imagen satelital compuesta en falso color utilizando las bandas del infrarrojo cercano, rojo y verde para el Lago Superior, el norte de Minnesota y las Islas Apóstoles de Wisconsin. ....	61
Ilustración 2.20 Imagen infrarroja en color del sureste de Dakota del Sur se anunció como la primera imagen adquirida por el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). ....	64
Ilustración 2.21 La primera imagen de Landsat 8 capturó el área donde se encuentran las Grandes Llanuras y las Montañas Rocosas en Colorado. ....	66
Ilustración 2.22 Primeras imágenes adquiridas por el Satélite Landsat 9 .....	69
Ilustración 3.1 Áreas afectadas por incendios forestales. ....	71
Ilustración 3.2 Análisis temporal de la temperatura gestiones 2010 al 2020 .....	75
Ilustración 3.3 Análisis temporal de la temperatura a lo largo del año. ....	76
Ilustración 3.4 Análisis temporal de la humedad gestiones 2010 al 2020. ....	77
Ilustración 3.5 Análisis temporal de la temperatura a lo largo del año. ....	78
Ilustración 3.6 Análisis temporal de la presión gestiones 2010 al 2020. ....	80
Ilustración 3.7 Análisis temporal de la presión a lo largo del año. ....	80
Ilustración 3.8 Comportamiento de la temperatura y humedad para las gestiones 2010 al 2020 .....	82
Ilustración 3.9 Diagrama de bloques para la Ingeniería de proyecto. ....	82
Ilustración 3.10 Diagrama de bloques detallado para la Ingeniería de proyecto. ....	83
Ilustración 3.11 Diagrama de flujo del Algoritmo para el procesamiento de las imágenes Landsat 8. ....	85

Ilustración 3.12 Pagina para descarga de imágenes del USGS .....	88
Ilustración 3.13 Pestaña de presentación de la página del USGS .....	89
Ilustración 3.14 Selección de área en la página del USGS.....	89
Ilustración 3.15 Pestaña para definir el rango de fechas y cobertura de nubes de un área en el USGS.....	90
Ilustración 3.16 Pestaña para definir el Satélite de descarga y observación de los resultados hallados en el USGS.....	91
Ilustración 3.17 Observación de diferentes tomas del municipio de San Ignacio de Velasco.	91
Ilustración 3.18 Opciones de descarga para las imágenes del USGS.....	92
Ilustración 3.19 Corrección del metadato de una imagen Landsat 8.....	93
Ilustración 3.20 Pestaña de calibración radiométrica en Software Envi .....	94
Ilustración 3.21 Imagen Landsat calibrada con niveles de radiancia. ....	95
Ilustración 3.22 Pestaña para cambio de zona en una imagen Landsat 8.....	96
Ilustración 3.23 Pestaña para la aplicación del método Flaash en Software Envi.....	99
Ilustración 3.24 Imagen Landsat 8 con corrección por el método Flaash. ....	99
Ilustración 3.25 Ventana de visualización de niveles de reflectancia de una imagen. ....	100
Ilustración 3.26 Ventana para la normalización de los niveles de reflectancia, e imagen Landsat tras la normalización de sus niveles de reflectancia. ....	101
Ilustración 3.27 Visualización de los niveles de reflectancia normalizados de una imagen Landsat.....	101
Ilustración 3.28 Código del programa para cargar las imágenes en RStudio.....	102
Ilustración 3.29 Imagen Landsat con bordes negros graficada en RStudio.....	103
Ilustración 3.30 Imagen Landsat tras la aplicación de la función drawPoly .....	104

Ilustración 3.31 Código del programa para eliminar bordes oscuros de la imagen Landsat. .	104
Ilustración 3.32 Imagen Landsat con corrección de los bordes negros en RStudio. ....	105
Ilustración 3.33 Código para verificación de orígenes y generación del mosaico de una imagen Landsat en RStudio.....	106
Ilustración 3.34 Código para importar y modificar un shapefile.....	107
Ilustración 3.35 Imagen del mosaico y el Shapefile de San Ignacio de Velasco. ....	107
Ilustración 3.36 Código para el recorte de una imagen Landsat. ....	108
Ilustración 3.37 Imagen pre procesada del Municipio de San Ignacio de Velasco (Pre incendio).....	108
Ilustración 3.38 Imagen pre procesada del Municipio de San Ignacio de Velasco (Post incendio).....	109
Ilustración 3.39 Diagrama de bloques para obtener la severidad en campo.....	110
Ilustración 3.40 Medición del área de estudio. ....	112
Ilustración 3.41 Delimitación del área de estudio. ....	112
Ilustración 3.42 Área de estudio con alta severidad. ....	113
Ilustración 3.43 Niveles de severidad para el índice CBI.....	113
Ilustración 3.44 Observación de áreas con severidad alta. ....	114
Ilustración 3.45 Observación de área con severidad moderada.....	114
Ilustración 3.46 Observación de áreas con baja severidad. ....	115
Ilustración 3.47 Observación y medición de los diferentes tipos de severidad. ....	116
Ilustración 3.48 Formulario para la determinación de severidad en campo (CBI).....	117
Ilustración 3.49 Obtención de coordenadas del mapa en el Software Envi. ....	118
Ilustración 3.50 Firma espectral del suelo quemado con el suelo de vegetación saludable ...	120

Ilustración 3.51 Mapa pre incendio tras la aplicación del índice NBR. ....	122
Ilustración 3.52 Mapa post incendio tras la aplicación del índice NBR.....	122
Ilustración 3.53 Mapa con clasificación no supervisada para el índice RDNBR. ....	128
Ilustración 3.54 Puntos de campo con proyección en mapa de Google Earth.....	130
Ilustración 3.55 Ajuste de la mejor regresión DNBR con las muestras de entrenamiento.....	136
Ilustración 3.56 Ajuste de la mejor regresión RBR con las muestras de entrenamiento.....	138
Ilustración 3.57 Ajuste de la mejor regresión RDNBR con las muestras de entrenamiento..	140
Ilustración 4.1 Histograma de la frecuencia de valores DNBR.....	146
Ilustración 4.2 Mapa con diferentes severidades obtenido tras la aplicación del modelo hallado. ....	148
Ilustración 4.3 Mapa del área de estudio con aplicación del modelo para la determinación de la severidad.....	149
Ilustración 4.4 Mapa del área de estudio con los puntos del trabajo de campo.....	150

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Principales bandas espectrales descritas por los sensores remotos y sus aplicaciones. .....	20
Tabla 2.2 Características Satélite DMC. ....	42
Tabla 2.3 Satélites operativos de la DMC. ....	43
Tabla 2.4 Características Satélite EARTH OBSERVING – 1 (EO-1).....	43
Tabla 2.5 Diferentes resoluciones del satélite Landsat-7.....	44
Tabla 2.6 Características de los sensores 1-4 del Landsat 7.....	45
Tabla 2.7 Características de los sensores 5-7 del Landsat 7.....	45
Tabla 2.8 Características del satélite Landsat 8.....	47
Tabla 2.9 Bandas espectrales del sensor HRG.....	49
Tabla 2.10 Características Satélite Terra.....	49
Tabla 2.11 Bandas espectrales del Satélite Sentinel 2.....	50
Tabla 3.1 Datos de incendios para el municipio de San Ignacio de Velasco. ....	71
Tabla 3.2 Coordenadas del mapa con severidades obtenidas del trabajo de campo. ....	118
Tabla 3.3 Valores de severidad para el índice NBR.....	121
Tabla 3.4 Niveles de severidad en incendios obtenidos a partir del DNBR, propuesto por la USGS.....	123
Tabla 3.5 Rango de severidades aplicados para el índice DNBR. ....	124
Tabla 3.6 Mapa con clasificación no supervisada para el índice DNBR. ....	124
Tabla 3.7 Rango de severidades aplicados para el índice RBR.....	126
Tabla 3.8 Mapa con clasificación no supervisada para el índice RBR.....	126
Tabla 3.9 Rango de severidades aplicados para el índice RDNBR.....	127

Tabla 3.10 Comparación de índice CBI con índices DNBR, RBR y RDNBR. ....	129
Tabla 3.11 Muestreo de los datos en muestras de entrenamiento y muestras de testeo. ....	131
Tabla 3.12 Valores de severidad CBI versus valores DNBR. ....	132
Tabla 3.13 Valores de severidad CBI versus valores RBR. ....	133
Tabla 3.14 Valores de severidad CBI versus valores RDNBR. ....	133
Tabla 3.15 Comparación de diferentes regresiones para el índice DNBR. ....	135
Tabla 3.16 Comparación de diferentes regresiones para el índice RBR. ....	137
Tabla 3.17 Comparación de diferentes regresiones para el índice RDNBR. ....	139
Tabla 3.18 Comparación de las mejores regresiones de los índices aplicados.....	141
Tabla 3.19 Comparación de valores predichos con valores en campo generados por la regresión cubica DNBR.....	143
Tabla 4.1 Niveles de severidad para el índice CBI.....	147
Tabla 4.2 Valor del índice CBI para cada tipo de severidad. ....	147
Tabla 4.3 Matriz de clasificación utilizado en el programa. ....	148
Tabla 4.4 Número de hectáreas afectadas en el área de estudio por cada tipo de severidad..	151

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

AIC	Criterio de información de Akaike
ALI	Advanced Land Imager
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CBI	Composite Burn Index
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
COPERNICUS	Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea
DMC	Disaster Monitoring Constellation
DNBR	Difference Normalized Burn Ratio
ENVI	Software utilizado en analizar y procesando geospatial
EO-1	Earth Observing 1
EROS	Earth Remote Observation Satellite
ERTS	Earth Resources Technology Satellite
ESA	Agencia Espacial Europea
ETM	Enhanced Thematic Mapper
FAN	Fundación Amigos de la Naturaleza
FCBC	Fundación de Cuidado del Bosque Chiquitano
FLAASH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hy- percubes
GFW	Global Forest Watch
GIMP	General Image Manipulation Program
GSD	Ground Sampling Distance
HRG	High Resolution Geometric
HRS	High Resolution Stereoscopic
ICE	Image Composite Editor

ImageJ	Programa informático de tratamiento digital de imagen
IRT	Infrarrojo lejano o térmico
LANDSAT	Satélite para la observación de la tierra de alta resolución
LDCM	Landsat Data Continuity Mission
LIDAR	Light Detection And Ranging
LPIP	Landsat Principal Investigators Program
METEOSAT	Satélites meteorológicos geoestacionarios construidos y lanzados por la ESA
MMAyA	Ministerio de Medio Ambiente y Agua
MOSTRAN	MODerate re- solution atmospheric TRANsmision
MSS	Multispectral Scanner Sensor
MWIR	Mid-wavelength Infrared (Infrarrojo de onda media)
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio
NBR	Normalized Burn Ratio
NIR	Near InfraRed (Infrarrojo cercano)
NMP	New Millennium Program
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Administration
OLI	Operational Land Imager
RADAR	Radio Detection and Ranging
RBR	Relativized Burn Ratio
RBV	Return Beam Vidicon
RdNBR	Relative Difference Normalized Burn Ratio
RGB	Sistema de composición de colores basado en Red, Green y Blue
SERNAP	Servicio Nacional de Áreas Protegidas
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre

SSR	Registradores de Estado Sólido
SSTL	Surrey Satellite Technology Ltd
SVR	Support Vector Regression
SWIR	Short Wave InfraRed (Infrarrojo de onda corta)
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
TOA	Reflectancia de la parte superior de la atmósfera (Top Of Atmosphere)
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
UTM	Universal Transverse Mercator
VNIR	Visible and Near-InfraRed
WRS	World Reference System

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes.

Actualmente se han registrado numerosas cantidades de pérdida de vegetación y daño en el suelo a causa de los incendios forestales. Si bien la deforestación es un proceso que se aplica en zonas de densa vegetación para la reutilización del suelo como zonas de cultivo, los métodos aplicados como el chaqueo o incendios generan un gran daño y degradación al suelo, haciendo que el mismo en algunos casos pierda fertilidad, y su regeneración podría tomar años o décadas. [1]

Asimismo, a lo largo de todos los años se producen numerosos incendios forestales en los diferentes departamentos del Estado Plurinacional de Bolivia, los cuales pueden ser ocasionados por diferentes factores como: intensa sequía, el cambio climático, la deforestación, la expansión de la frontera agrícola, los asentamientos ilegales, las medidas políticas favorables al agro negocio y las quemaduras tanto legales como ilegales. Sin embargo, durante los últimos años se vio un gran incremento en la pérdida de vegetación a causa de los incendios forestales, estos hechos sugieren que los suelos están sufriendo un gran deterioro asociado a la infertilidad, por lo cual, la realización de un estudio que determine el grado de severidad de daño ocasionado en dichas áreas es fundamental.

En los últimos años el Municipio de San Ignacio de Velasco presentó la mayor cantidad de emergencias forestales en la zona de la Amazonia Boliviana [2]. Este hecho despertó un gran interés en diferentes entidades privadas y estatales como; Servicio Nacional de Áreas Protegidas (SERNAP), Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), y la Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano (FCBC), las cuales actualmente se encuentran trabajando en diferentes medidas para combatir dichas catástrofes [3]. Por lo expuesto, el presente proyecto tiene como objetivo apoyar al control y monitoreo de dichas áreas utilizando diferentes técnicas de teledetección, mismas que nos permitan encontrar el grado de severidad de quemadura para las zonas más afectadas del Municipio de San Ignacio de Velasco.

La Teledetección en la actualidad tiene muchas aplicaciones como; estimación del consumo de agua en la agricultura, mapeo de bosques y cultivos, seguimiento de prácticas agrícolas, detección y seguimiento de inundaciones, detección de grandes catástrofes naturales, etc. Conceptualmente, la Teledetección se basa en el principio de obtener información de un área determinada sin la necesidad de estar en contacto con la misma (Análisis y procesamiento de imágenes satelitales), la información recabada siempre es expuesta en forma de un producto específico que responda una necesidad humana. Si bien este tipo de estudios se pueden realizar con diferentes trabajos de campo a través de la toma de muestras o análisis del lugar, los procedimientos nos resultan muy costosos y en la mayoría de los casos toman mucho tiempo. El procesamiento de imágenes satelitales, nos permiten ver un panorama general y fidedigno del área de estudio por analizar, ya que el mismo puede verse como un “Todo”. El análisis del comportamiento de diferentes catástrofes naturales, la contaminación de las aguas y monitoreo de áreas verdes (citando algunos ejemplos) necesitan un control y seguimiento constante que nos permita observar las diferentes relaciones y causas de forma globalizada.

Asimismo, es importante mencionar que en la actualidad existe un mayor acceso a la obtención de imágenes satelitales gracias a entidades gubernamentales y de apoyo al medio ambiente como son; Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), Agencia Espacial Europea (ESA), Programa de la Unión Europea de Observación y Monitorización de la Tierra (COPERNICUS), entre otros que nos permiten el acceso libre y gratuito a diferentes imágenes alrededor del globo. Entre las características más importantes que se deben considerar a la hora de descargar una imagen satelital son; tipo de estudio o investigación, bandas de operación, resolución de sus sensores, resolución espacial, resolución temporal y resolución radiométrica. En relación al procesamiento de la imagen, existen muchas técnicas y plataformas capaces de obtener diferentes productos satelitales, sin embargo, es importante señalar que no se puede realizar una generalización en el procesamiento de la imagen, ya que cada zona en el globo posee características únicas de; elevación, temperatura y tipo de suelo, que afectan el cálculo de la reflectividad y absorción en la obtención del producto. Esto genera la necesidad de recurrir a factores de corrección en los algoritmos actuales, de manera que los mismos puedan ser acoplados a las características del área de estudio.

La implementación, corrección y procesamiento de las imágenes puede realizarse a través de diferentes Softwares (RStudio, Python, MatLab) que vienen incorporadas con diferentes librerías que permiten trabajar las imágenes de forma matricial, facilitando así la manipulación de datos. Para el proyecto, se ha decidido utilizar RStudio debido a que posee una mayor cantidad de librerías y repositorios disponibles relacionados al procesamiento de imágenes, así como también, se caracteriza por ser un Software libre, multiplataforma y de fácil acceso a los usuarios.

Para la determinación del grado de severidad por quemadura en los suelos se realizará un procesamiento y análisis de diferentes imágenes satelitales que componen al Municipio de San Ignacio de Velasco. El objetivo de este análisis es obtener mapas del área que puedan diferenciar los tipos de daño generados en su superficie, determinando así el daño generado en los suelos por los incendios forestales, de igual manera se realizarán estudios de campo que se contrastarán con los datos obtenidos del satélite para realizar la corrección del modelo estandarizado DNBR (Difference Normalized Burn Ratio), y obtener cartografía fidedigna del área de trabajo. El nuevo modelo generado podrá ser utilizado para la obtención de nuevos mapas que no se verán afectados por las características de elevación, reflectividad y posicionamiento del área de estudio.

La obtención de las muestras en el trabajo de campo se realizará a través del método CBI propuesto por Key y Benson, el cual consiste en una evaluación inicial observando los diferentes tipos de severidad en el área mediante aspectos visuales, donde se consideran diferentes severidades para cada tipo de vegetación. De las severidades obtenidas para cada vegetación, se calcula el promedio de severidad para cada parcela de estudio el cual será definido como la severidad de la parcela. Así mismo se tiene una escala donde: de 0 a 0.25 se considera no área quemada, 0.25 a 1.25 severidad baja, 1.25 a 2.25 severidad moderada y mayor a 2.25 severidad alta. Análogamente, las imágenes se obtendrán del satélite Landsat debido a que posee una mejor resolución radiométrica, y la resolución espacial es favorable para este tipo de estudios porque nuestra área es amplia.

## 1.2. Planteamiento del problema.

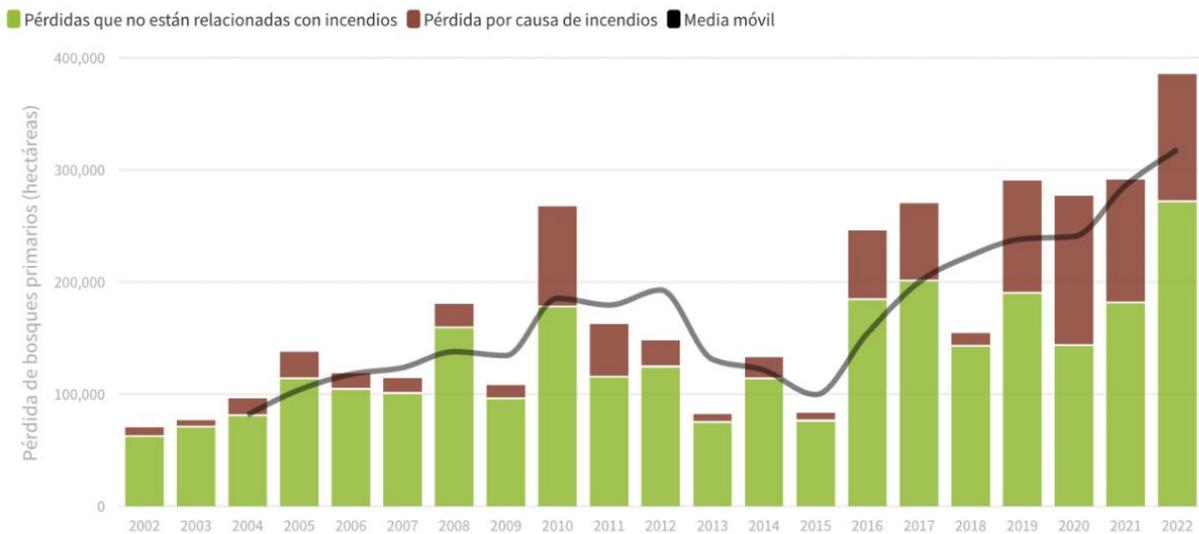
En la actualidad uno de los problemas más preocupantes a lo largo de todos los años son los incendios forestales a causa de la deforestación.

Entre julio y octubre del año 2019 se registró en Bolivia uno de los eventos de quemaduras de vegetación más extenso y posiblemente de mayor impacto ecológico de la última década en el departamento de Santa Cruz (Bolivia), tomando en cuenta los últimos 18 años de recurrencia de incendios durante la época seca (invierno austral), los incendios del año 2019 se los puede considerar como extremos porque sucedieron en una serie recurrente de fuegos desde julio a octubre, por la amplia extensión y gran magnitud fueron considerados como incendios de sexta generación. Estos fenómenos provocan una gran voracidad de las llamas, las cuales pueden llegar a consumir más de 4.000 hectáreas/hora. Sin duda, este tipo de fenómenos indica que los incendios del 2019 pudieron tener un fuerte impacto en los ecosistemas y en los medios de vida de las poblaciones locales. [4]

Según MONGABAY, Bolivia ocupa el cuarto lugar a nivel mundial y el segundo en América Latina entre los países que más bosques primarios han perdido en el 2019, según el mapa de Global Forest Watch. [2]

Las cifras de GFW indica que un total de 290.000 hectáreas de bosques primarios han sido arrasados debido, principalmente, a los incendios forestales ocurridos en La Chiquitania. “Para el 2019 se registraron más de 6 millones de hectáreas quemadas que se acerca a la cifra de 10 millones de hectáreas registradas el 2010” [2]. La Fundación Amigos de la Naturaleza (FAN) ha realizado evaluaciones de cambio en el uso del suelo y deforestación, se ha detectado que en el periodo 2015-2018 ocurrió una aceleración de pérdida de bosque que supera las 440 mil hectáreas por año. “Gran parte de esta superficie ocurre en el Municipio de San Ignacio de Velasco perteneciente al departamento de Santa Cruz, mismo que en las últimas gestiones fue denominado como zona de emergencias forestales según la página del Gobierno Autónomo de Santa Cruz”. [5]

## PÉRDIDA DE BOSQUES PRIMARIOS DE BOLIVIA, DE 2002 A 2022

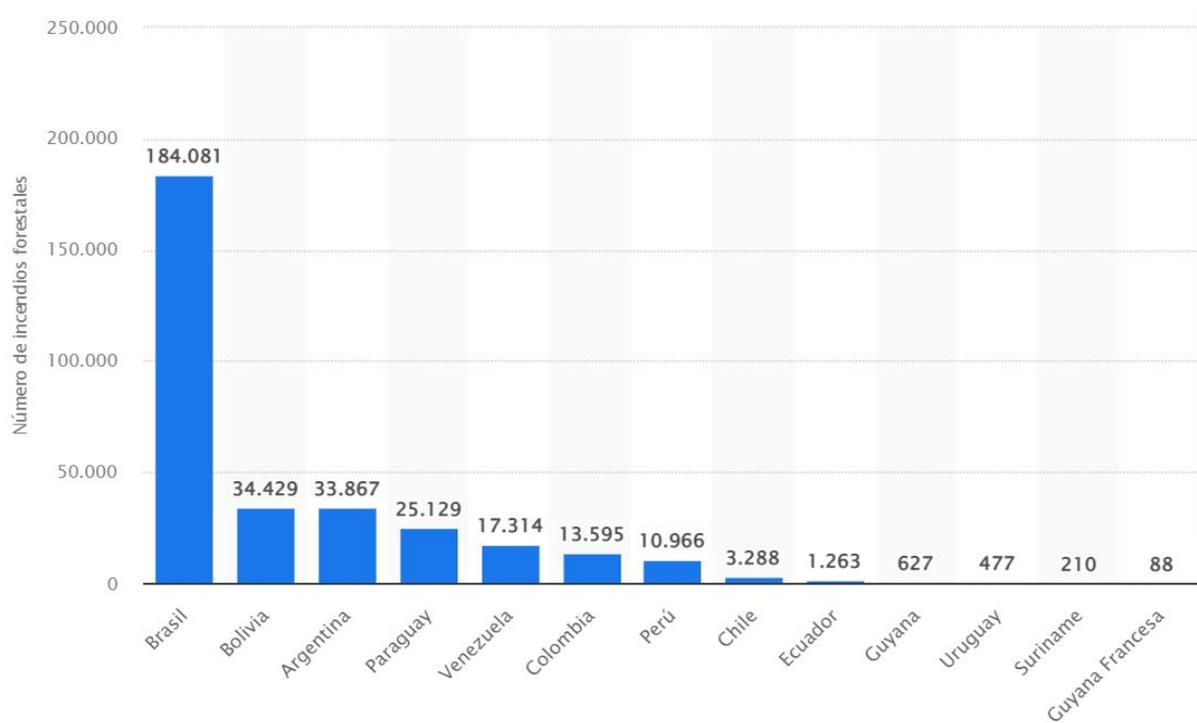


*Ilustración 1.1 Cantidad de bosques primarios perdidos en Bolivia en los últimos 21 años.*

*Fuente: Elaboración de Mongabay.*

*Recuperado de: <https://es.mongabay.com/>*

De la misma manera según la plataforma STATISTA, una plataforma líder de datos y estadísticas a nivel mundial, registra que en Brasil se contabilizaron aproximadamente 184.000 brotes de incendios forestales a lo largo de 2021, siendo esta la cifra más alta en América del Sur, y con más de 34.000 brotes, Bolivia registró el segundo mayor número de incendios forestales en la región ese año [6].



*Ilustración 1.2. Brotes de incendios forestales Sud América 2021*

*Fuente: Statista*

*Recuperado de: <https://es.statista.com/>*

Por las cifras anteriormente mencionadas un análisis y valoración de los impactos provocados por los incendios forestales sobre los suelos requiere abordar con rapidez el estudio y estimación de los efectos de los incendios sobre los suelos dañados, y eventualmente poner en marcha actuaciones de mitigación, rehabilitación y restauración. Para que esta respuesta sea eficaz, el gestor necesita disponer en el mínimo tiempo posible, del máximo de información sobre el medio afectado y las características de suelo dañado. [4]

Actualmente las técnicas de monitoreo y control que utilizan las instituciones gubernamentales como el SERNAP, MMAyA, FCBC están basadas en técnicas de muestreo de campo a través de la técnica CBI y toma de imágenes por drones. Si bien estas técnicas pueden dar un pantallazo del estado actual de los suelos, las mismas no permiten identificar patrones y estudios a largo plazo del estado del suelo. Lo cual genera que las muestras obtenidas sean un reflejo instantáneo y temporal del estado de nuestras áreas de estudio. Asimismo, la cantidad de datos y muestras tomadas a través de dichas técnicas se realizan anualmente, lo cual genera una base datos pobre que no permite visualizar la degradación del estado del suelo.

### **1.3. Justificación.**

#### **1.3.1. Justificación Académica.**

Actualmente la Teledetección es una herramienta que tiene muchas aplicaciones en diferentes áreas, hacer uso de esta herramienta nos permite obtener información en tiempo real, manipular datos de manera masiva y trabajar con información que no es visible para el ojo humano, ya que haciendo uso de los diferentes algoritmos para el procesamiento de imágenes, nos hace comprender que no todas las imágenes pueden ser sometidas a un mismo proceso y que cada imagen responde de manera distinta a cada algoritmo.

Así también estudiar las características de un satélite como: tipos de bandas, tipos de sensores, resolución radiométrica, resolución espacial, etc. Nos otorga la capacidad de ver las mejores aplicaciones y servicio que se le puede dar a dicho satélite.

Analizar una imagen satelital sin un debido procesamiento podría encaminarnos a obtener una pésima investigación, así como resultados erróneos, por ello, realizar un respectivo procesamiento a las imágenes no solo nos ayudará a mejorar la imagen mostrando ciertos detalles que son difíciles de notar, de la misma manera nuestros resultados serán de mayor fiabilidad.

Por las diferentes ventajas mencionadas, aplicar un estudio de teledetección será de gran utilidad en el entorno académico.

#### **1.3.2. Justificación Económica.**

Actualmente efectuar un estudio de laboratorio para determinar la severidad de daño en los suelos a causa de incendios forestales, no solo sería complejo y dificultoso, además el estudio tendría un costo demasiado elevado, por lo cual, la Teledetección espacial es una técnica imprescindible para el estudio y seguimiento de algunos de los principales problemas en la degradación de suelos.

Con el uso del algoritmo generado para la superficie de estudio, se podrá analizar las características de daño en el suelo a mayor escala y en menor tiempo, eliminando así, diferentes gastos que se podrían generar realizando estudios bajo otras técnicas.

### **1.3.3. Justificación Social.**

Actualmente existe poca conciencia por parte de la sociedad hacia el medio ambiente y la biodiversidad que se tiene en los diferentes bosques del área nacional, por lo cual, con los resultados se dará a conocer la magnitud y el daño que pueden llegar a causar dichos incendios, y de esta manera concientizar a la población sobre el cuidado del medio ambiente. Así también hacer notar que los incendios forestales causan gran impacto en la vegetación, los mismos pueden influir en sus riquezas minerales, productividad, regeneración, etc. Por lo cual, determinar la severidad de daño en los suelos nos ayudará a tomar distintas maneras de prevención y cuidado en nuestros bosques.

### **1.4. Objetivo general.**

- Determinar el grado de severidad producido en los suelos por incendios forestales en la zona de la Amazonia Boliviana a través de técnicas de Teledetección Satelital “Caso Municipio de San Ignacio de Velasco”.

### **1.5. Objetivos secundarios.**

- Seleccionar un satélite de Teledetección adecuado, para la descarga y el procesamiento de imágenes satelitales.
- Encontrar un algoritmo para el procesamiento de imágenes satelitales y un modelo matemático de mayor ajuste, con el fin de observar las bandas que más información aportan en la determinación de la severidad.
- Realizar correcciones atmosféricas, radiométricas, geométricas en la imagen satelital y procesar las imágenes satelitales bajo los diferentes modelos existentes para encontrar el grado de severidad en los suelos por incendios forestales.
- Obtener mapas satelitales de la severidad de daño en el suelo posteriores a los incendios forestales.
- Realizar un trabajo de campo determinando de severidad del suelo a través del índice CBI.

- Realizar una regresión entre los resultados obtenidos por los diferentes índices con los resultados obtenidos por el trabajo de campo, con el fin de obtener un modelo de mayor precisión.
- Realizar la evaluación del modelo obtenido mediante la aplicación del mismo a una imagen del Municipio de San Ignacio de Velasco, y obtener un mapa con diferentes severidades.

#### **1.6. Límites del proyecto.**

- Es necesario mencionar que el área de estudio será el Municipio de San Ignacio de Velasco perteneciente a la Amazonia Boliviana, ya que es un área en el cual, a lo largo de los años siempre se han generado incendios forestales, ya sean incendios intencionados o accidentales. Así también la zona es considerada como punto de desastres ecológicos más graves en los últimos 10 años.
- Se realizará el estudio mediante el uso del software RStudio, ya que este se distingue por ser un software libre, utiliza lenguaje de alto nivel y es multiplataforma.
- Las imágenes finales de severidad obtenidas solo estarán en formato png, jpg o TIF esto dependiendo de cómo el usuario final realiza la exportación del archivo en el Software RStudio.
- Al realizar el estudio se obtendrán diferentes grados de severidad los cuales solo servirán como referencia en relación a la magnitud de daño generado en el área, sin embargo, el usuario deberá determinar las diferentes medidas de restauración.
- El algoritmo y modelo que se encontrarán para el estudio de dicha zona será de uso específico para el área de trabajo, sin embargo, el mismo puede ser aplicado en zonas con similar topología.
- En el trabajo de campo para la medida de la severidad, se aplicará el método sobre la medición del índice CBI propuesto por Key & Benson.

## 1.7. Alcances del proyecto

- Se determinará las bandas del satélite de uso preferente, para el estudio del daño en los suelos tras incendios forestales.
- Bajo diferentes tipos de regresión se hallará un modelo mejorado y propio del área de estudio, de tal manera que el nuevo modelo será más adecuado para el estudio de daño en los suelos tras incendios forestales.
- Con los resultados de las imágenes podremos identificar las áreas con mayor daño en los suelos a causas de los incendios forestales y de esta manera elaborar un esquema con los diferentes grados de daño de quemadura en la superficie.
- Obtendremos resultados de la severidad medida en campo como también resultados mediante técnicas de Teledetección, entre los cuales se podrán contrastar los resultados.
- Tendremos todo el procesamiento de las imágenes y los resultados en el Software RStudio de tal manera que bajo el modelo hallado se pueda procesar otras imágenes de daño en los suelos a causa de incendios forestales.
- Se generarán imágenes en las cuales, se diferenciarán los diferentes grados de daño en los suelos tras incendios forestales.

## CAPÍTULO 2

### 2. MARCO TEÓRICO.

#### 2.1. Definición de Teledetección.

La teledetección se define como aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación remota sea posible, es preciso que entre el objeto de estudio y el sensor exista algún tipo de interacción. [7]

Así también la teledetección espacial es una técnica que nos permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, estamos suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o un haz energético artificial, por lo cual, es necesario que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre donde la señal pueda almacenarse y procesarse para una determinada aplicación. [7]

#### 2.2. Tipos de Teledetección.

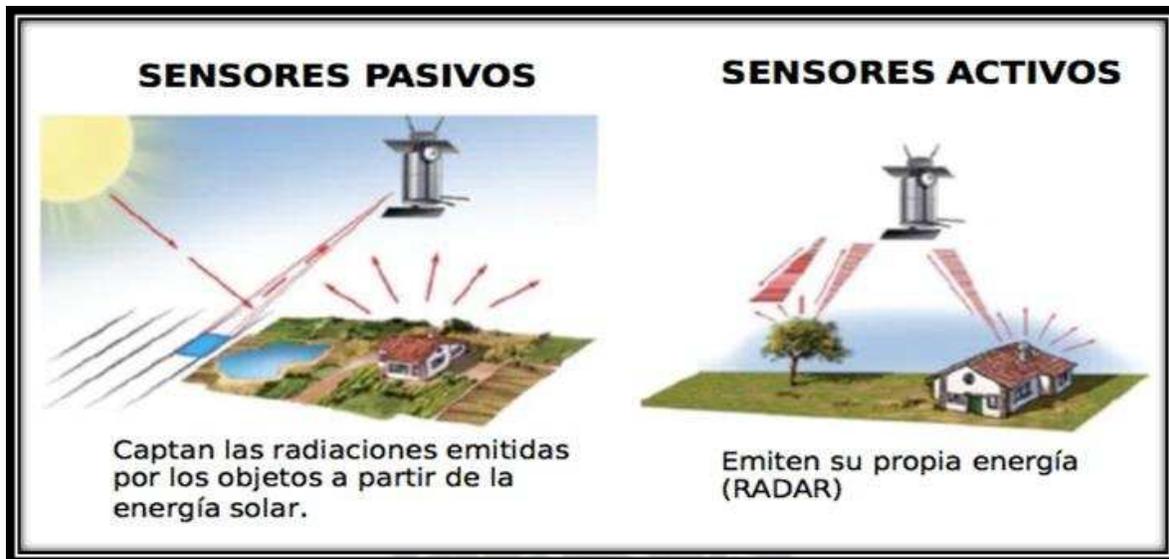
El sol tiene un papel muy importante en el tipo de teledetección que estamos estudiando, ya que proporciona una fuente de energía muy conveniente para la Teledetección.

La energía del sol se refleja, como ocurre con las longitudes de onda visibles, o se absorbe y luego se vuelve a emitir, como ocurre con las longitudes de onda del infrarrojo térmico. Los sistemas de detección remota que miden la energía que está naturalmente disponible se denominan sensores pasivos, en este entendido, los sensores pasivos solo se pueden usar para detectar energía cuando la energía natural está disponible. [8]

Por lo general, en la teledetección se mide la energía que se emanó de la superficie de la tierra. Si la fuente de la energía medida es el sol, entonces se identifica como teledetección pasiva, y el resultado de esta medición puede ser una imagen digital. [9]

Cuando la energía medida es emitida desde el sensor de la plataforma es definida como teledetección activa, lo cual se presenta en sensores de RADAR o LIDAR que trabajan en el rango de las microondas. [9]

El LIDAR determina la distancia con la luz, implica la transmisión de impulsos luminosos y la comprobación de la cantidad de energía recuperada. La ubicación del objetivo y la distancia se determinan multiplicando el tiempo por la velocidad de la luz. Así también es necesario mencionar que la mayoría de los dispositivos de este tipo de teledetección emplean microondas, ya que son relativamente inmunes en las condiciones meteorológicas de estudio. [10]



*Ilustración 2.1 Tipos de Teledetección (Pasiva y Activa)*

*Fuente: Dulce Andrea, Aglae, Carlos y Juan Carlos*

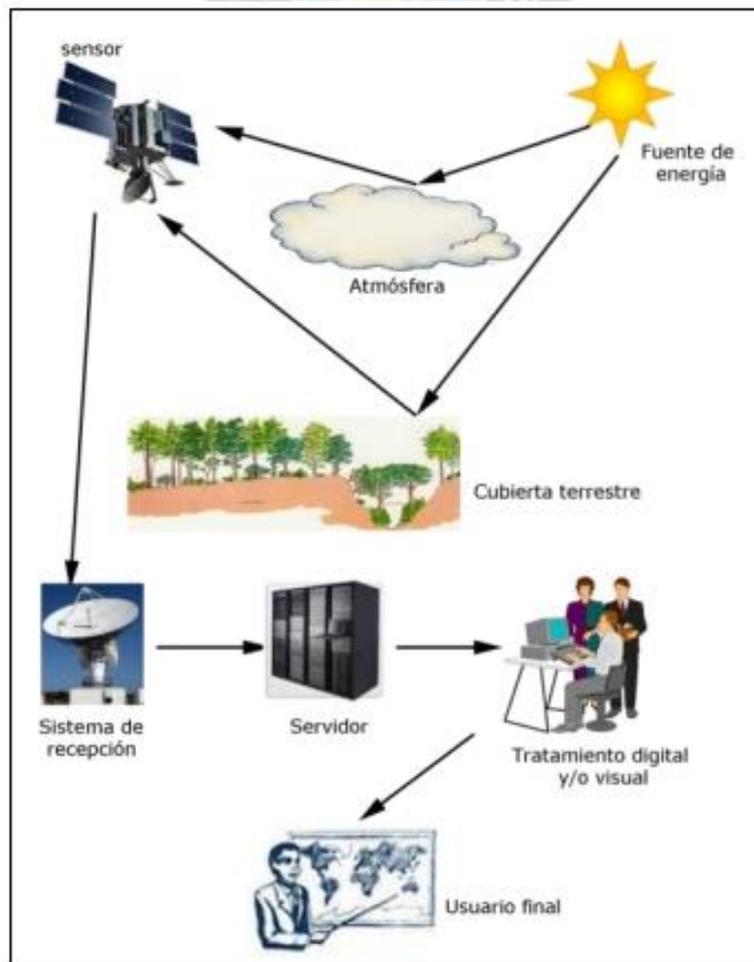
*Recuperado de: <https://cartografiatematicaequipo2.blogspot.com/p/eficacia-sde-los-mapas.html>*

### **2.3. Componentes de un sistema de Teledetección.**

Según (CHUVIECO 1995) [7]; un sistema de teledetección espacial incluye los siguientes elementos:

- I. Fuente de energía: Corresponde al origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. Cuando la energía proviene de un foco externo al sensor se habla de teledetección pasiva; y por el contrario cuando el haz energético es emitido por el sensor, se habla de Teledetección activa.
- II. Cubierta terrestre: La cubierta terrestre es quien recibe la señal energética, y está formada por las distintas masas de vegetación, suelos, cuerpos de agua, etc.

- III. Sistema sensor: Compuesto por el sensor propiamente dicho y la plataforma que lo alberga. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla, grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
- IV. Sistema de recepción – comercialización: Es donde se reciba la información transmitida por la plataforma, grabándose en un formato apropiado y que posterior a las correcciones realizadas, se distribuya a los interesados.
- V. Interprete: Aquel que convierte esos datos en información temática de interés, ya sea visual o digitalmente, de cara a facilitar la evaluación del problema en estudio.
- VI. Usuario final: Es el encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.



*Ilustración 2.2 Esquema de un sistema de Teledetección.*

*Fuente. Ariadna S. La Teledetección.*

*Recuperado de: <http://ariadnasancha.blogspot.com/2016/10/la-Teledeteccion.html>*

El símil de la visión humana puede ayudar a entender el significado de estos componentes. El ojo humano (III) recibe un haz energético procedente de los objetos exteriores (II) por reflejo de la luz solar (I). Esa señal se transmite al cerebro (IV), que es capaz de formar una serie de imágenes sobre el mundo real que le circunda. El individuo que observa es a la vez intérprete (V) y usuario final (VI) de la imagen detectada. lo que le permite tomar decisiones sobre su propio comportamiento. En otras palabras, la visión humana forma un sistema de Teledetección muy sofisticado, por cierto, puesto que nos permite caracterizar con mucho detalle los objetos que observamos. [7]

Sin embargo, nuestra percepción visual presenta también algunas limitaciones. Por un lado, se restringe por la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras, que sólo nos permiten apreciar un determinado tipo de energía, denominado, por esa razón, espectro visible. Otras formas energéticas, como el calor, no son observables visualmente. Por lo que parece conveniente contar unos ojos artificiales, que amplíen nuestras propias posibilidades. Por otro lado, el campo de visión humano está limitado por nuestra propia estatura, o a la que podemos adquirir desde observatorios naturales, por lo que cuenta con un pequeño radio de acción y además, se trata de una perspectiva oblicua. Ambos factores dificultan observar fenómenos muy extendidos, como inundaciones o incendios, donde las estimaciones visuales pueden ser imprecisas. Para paliar estas limitaciones, se ha acudido a sensores artificiales, montados sobre plataformas situadas a una cierta altitud. Con ellos, se tiene acceso a tipos de energía no visibles (ultravioleta, infrarrojo, microondas), y, además, desde una nueva perspectiva, vertical y panorámica. Esta nueva información expande notablemente nuestro conocimiento del medio que nos rodea, facilitando la interpretación de múltiples procesos que afectan al Planeta. [7]

#### **2.4. Importancia de la radiación electromagnética en Teledetección.**

La radiación electromagnética se define como las ondas producidas por la aceleración de una carga eléctrica. Es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan a través del espacio transportando energía. [11]

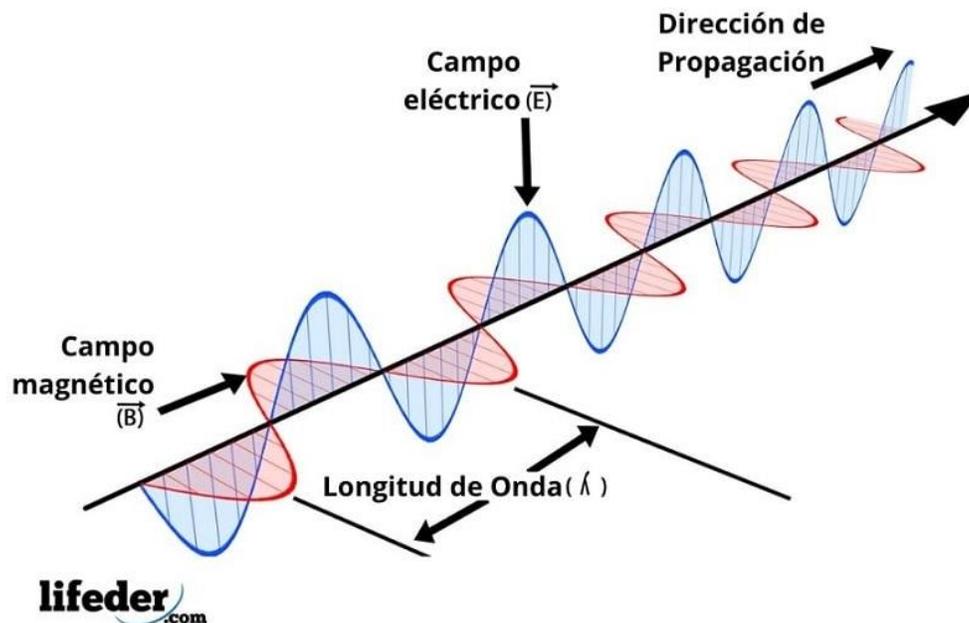
La radiación (solar reflejada, terrestre o emitida por el sensor y reflejada) que llega de la superficie terrestre y que ha atravesado la atmósfera, es almacenada en formato digital. Una

vez recuperados los datos en el centro de control del satélite, permitirán obtener información acerca de la superficie terrestre y de la atmósfera. El tipo de información que se obtiene dependerá de la longitud de onda en la que el sensor capte la radiación. [12]

Los sistemas de Teledetección se basan en la energía transmitida mediante radiación electromagnética. Esta radiación presenta un comportamiento ondulatorio armónico y continuo, mediante el cual se transmite de un lugar a otro a la velocidad de la luz, conteniendo dos campos ortogonales entre sí: campos eléctricos y campos magnéticos, ambos oscilantes. [7]

La radiación electromagnética consiste en un campo eléctrico (E) que varía en magnitud en una dirección perpendicular a la dirección en la que viaja la radiación, y un campo magnético (B) orientado en ángulo recto con el campo eléctrico. Ambos campos viajan a la velocidad de la luz. [8]

## Onda Electromagnética



*Ilustración 2.3 Esquema de propagación de onda electromagnética.*

*Fuente. Zapata, Fanny.*

*Recuperado de: <https://www.lifeder.com/movimiento-ondulatorio/>*

La observación remota es posible gracias a la interacción de un flujo energético con las cubiertas terrestres. Dicho flujo recibe el nombre de radiación electromagnética y ha sido explicada por dos teorías físicas:

- **Teoría ondulatoria.**

Para aquella radiación electromagnética es un fenómeno ondulatorio de propagación en el cual actúan los campos perpendiculares: el campo magnético y campo eléctrico. Esta teoría se explica sobre la base de dos conceptos fundamentales que son la longitud de onda y la frecuencia. [12]

Una ecuación importante que sustenta la teoría mencionada es la siguiente:

$$c = f \times \lambda \dots \text{Ecuacion (1)}$$

Donde:

c: es la velocidad de propagación de la luz ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) valor constante.

f: es la frecuencia en Hertz.

$\lambda$ : es la longitud de onda la cual puede ser expresada en micrómetros, nanómetros, etc.

- **Teoría cuántica.**

Nos explica el fenómeno de la radiación electromagnética basándose en sus propiedades energéticas.

El modelo de partícula asume que la energía viaja como un flujo de elementos discretos: los fotones. La energía transportada por cada fotón (Q) depende de la longitud de onda, de este modo ambos modelos se relacionan mediante las siguientes ecuaciones equivalentes. [12]

$$Q = h \times f \dots \text{Ecuacion (2)}$$

En donde si despejamos f de la ecuación (1), y la reemplazamos en la ecuación (2) obtenemos:

$$Q = \frac{h \times c}{\lambda} \dots \text{Ecuacion (3)}$$

Donde:

$h$ : representa la constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  Js ).

$c$ : es la velocidad de propagación de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s) valor constante.

La ecuación implica que, a menor longitud de onda, o lo que es lo mismo, a mayor frecuencia, mayor es la cantidad de energía transportada por la radiación.

Del análisis de la expresión se deduce que a medida que trabajemos con longitudes de onda mayores, sus contenidos energéticos serán menores por tanto habrá más dificultades para la detección de estas radiaciones. [7], [13]

Por lo anterior expuesto, podemos dar una definición sencilla, la cual indica que toda radiación electromagnética es una forma de energía que se propaga en forma de ondas que se desplazan en el vacío a la velocidad de la luz a 300000 km/s transportando cantidades discretas de energía. [14]

Entonces la radiación electromagnética es un término fundamental en Teledetección, ya que describe precisamente lo que mide el sensor y esta medida se cuantifica en vatios por metro cuadrado y estéreo-radián ( $W/m^2 sr^{-1}$ ). [7]

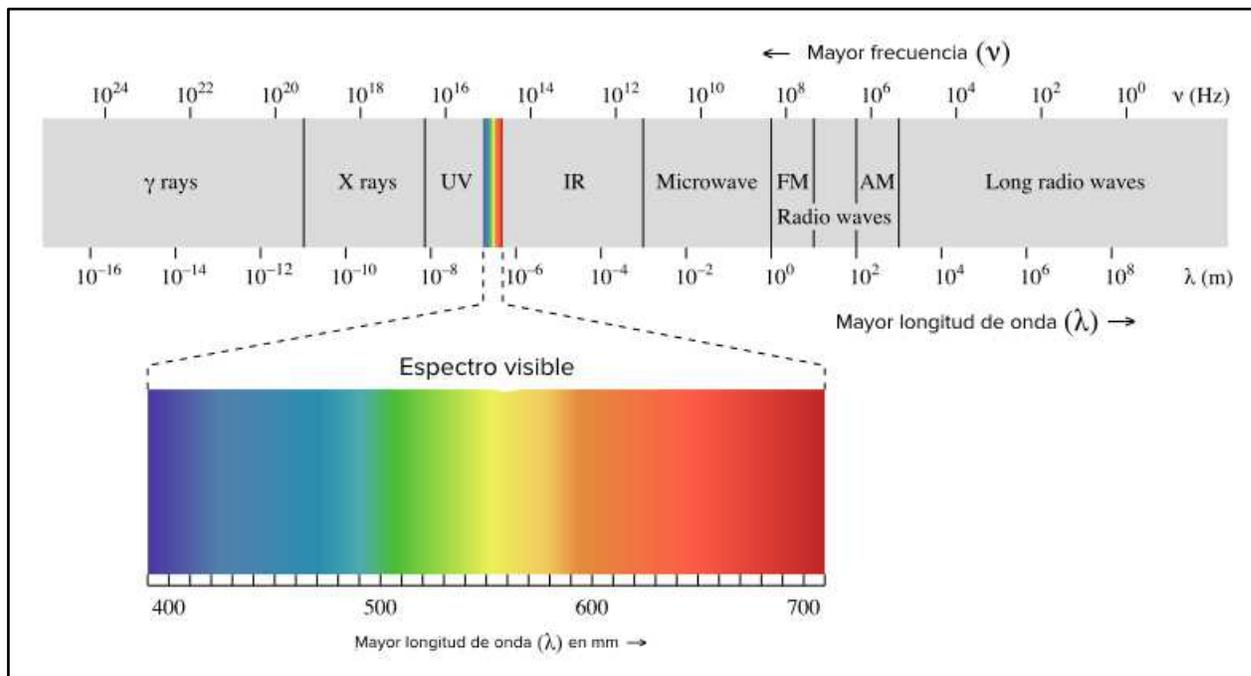
Todos los conceptos mencionados anteriormente son de fundamental importancia entenderlos e interpretarlos ya que los mismos son una base principal de la Teledetección. Así también es necesario conocer las diferentes interacciones que la radiación tiene con la superficie.

## **2.5. El espectro electromagnético.**

El espectro electromagnético es “el sistema que clasifica, de acuerdo con la longitud de onda, toda la energía (de corto cósmica a largo radio) que se mueve, armónicamente, a la velocidad constante de la luz”. [15]

La radiación de la luz visible es la que nos permite ver los objetos del mundo material que nos rodea. La luz blanca es una mezcla de rayos de luz combinados. Cada uno de estos rayos

tiene su propia  $\lambda$ , y es su variación la que permite obtener todos los colores posibles: violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo. La luz se puede descomponer mediante el prisma de Newton para observar cada uno de los colores que la componen. [16]



*Ilustración 2.4 El espectro electromagnético.*

*Fuente. ChemWiki de UC Davis (Universidad de California en Davis), CC-BY-NC-SA3.0*

Dentro del espectro hay ciertas bandas de especial interés para la Teledetección, las cuales se presentan a continuación.

### 2.5.1. Espectro visible.

Aproximadamente entre 400 -700 nm, 790-400 THz, la radiación electromagnética dentro de este intervalo es perceptible por el ojo humano. En estas longitudes de onda es máxima la radiación solar.

Se pueden distinguir tres bandas dentro del espectro visible, denominadas en función del color al que se asocian estos intervalos de longitudes de onda: Azul (400 a 500 nm) Verde (500 a 600 nm) y Rojo (600 a 700 nm). [17]

### **2.5.2. Infrarrojo cercano (IRC) o Near InfraRed (NIR).**

(Entre 700 -1300 nm, 430-230 THz).

Radiación Electromagnética cuya longitud de onda es inmediatamente superior a la del espectro visible es de especial interés debido a la información que se puede extraer mediante de su interacción con masas vegetales o concentraciones de humedad. [17]

#### **2.5.2.1. Infrarrojo medio.**

Dentro del cual se distinguen dos bandas:

- **Infrarrojo de onda corta o Short Wave InfraRed (SWIR) (1300-3000 nm, 230-100 THz):** Este intervalo se trata de una región idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación y en los suelos.
- **Infrarrojo de onda media (IRM) o Mid-wavelength Infrared (MWIR) (3000-8000 nm, 37-100 THz):** De gran utilidad para detectar focos de alta temperatura, como incendios y volcanes activos. [17]

### **2.5.3. Infrarrojo lejano o térmico (IRT) o Long-wavelength Infrared.**

(Entre 8000-14000 nm, 20- 37 THz).

En este intervalo se ubica la porción emisiva del espectro terrestre. Por lo tanto, en este tramo espectral se detecta el calor proveniente de la mayor parte de la cubierta terrestre. [17]

### **2.5.4. Micro-Ondas.**

(Entre  $10^7$ -  $10^9$  nm, 0.0003 - 0.03THz).

Se trata de una zona de interés ya que para estas frecuencias las perturbaciones atmosféricas son menores y es un tipo de energía transparente a la cubierta nubosa. Se suele utilizar en sensores activos. [17]

En la siguiente ilustración se puede observar las diferentes bandas espectrales y sus características en el campo de la Teledetección.

Banda espectral	Aplicaciones
Azul (0.45-0.5 $\mu\text{m}$ )	Penetración del agua, uso de la tierra, características de la vegetación, sedimentos
Verde (0.5-0.6 $\mu\text{m}$ )	Reflexión verde de la vegetación sana
Rojo (0.6-0.7 $\mu\text{m}$ )	Discriminación de la vegetación por la absorción de la clorofila
Pancromático (0.5-0.75)	Trazado del uso de la tierra
Infrarrojo reflectivo (0.75-0.9)	Biomasa, identificación de cultivos, límites de tierra y agua
Infrarrojo medio (1.5-1.75)	Cantidad vegetación, zonas áridas, nubosidad, hielo, nieve
Infrarrojo medio (2-2.35)	Geología, formación de rocas
Infrarrojo térmico (10-12.5)	Diferenciación temperatura, descargas térmicas, clasificación de la vegetación, inercia térmica
Microonda de onda corta (0.1-5 cm)	Cubrimiento de la nieve, profundidades, contenido de agua en la vegetación
Microonda de onda larga (5-24 cm)	Medidas del suelo, límites entre tierra y agua, penetración de la vegetación

*Tabla 2.1 Principales bandas espectrales descritas por los sensores remotos y sus aplicaciones.*

*Fuente. Rodríguez Chávez y Arredondo (2005).*

*Elaboración propia.*

Entonces se puede definir que el conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético. Dentro del espectro electromagnético se distinguen una serie de regiones, las más utilizadas por las diferentes técnicas de Teledetección son la luz visible, el infrarrojo reflejado, el infrarrojo térmico y las microondas (Radar). Cualquier cuerpo en la naturaleza emite radiación y lo hace con diferentes longitudes de onda. Entonces cantidad de energía que emite un cuerpo por radiación como la distribución de esta energía en diferentes longitudes de onda depende fundamentalmente de la temperatura de dicho cuerpo. [18]

## **2.6. Interacción entre la radiación y los objetos.**

Cuando la energía radiada, en este caso solar, choca contra un objeto, esta puede seguir tres caminos: [7]

**Reflexión:** Ocurre cuando la radiación no es absorbida por el cuerpo sobre el que incide y tampoco lo atraviesa, si no que rebota contra su superficie.

La reflectividad ( $\rho$ ) indica la fracción de energía incidente que es reflejada por la superficie sobre la que incide (flujo de energía reflejado/ flujo de energía incidente).

**Absorción:** Ocurre cuando la radiación es absorbida por el cuerpo y pasa a aumentar la energía contenida en este.

La absorptividad ( $\alpha$ ) es la fracción de energía incidente que es absorbida por el cuerpo sobre el que incide (flujo de energía absorbido/ flujo de energía incidente).

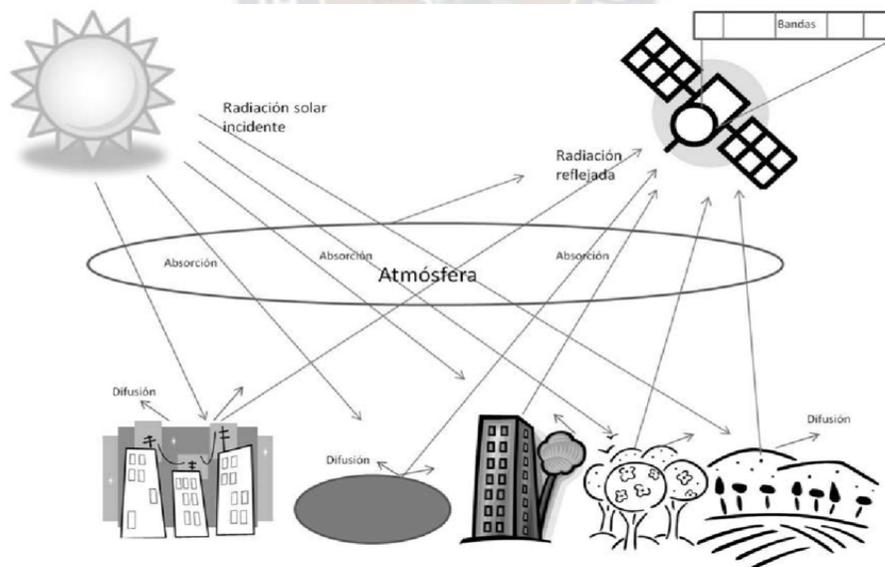
**Transmisión:** Ocurre cuando la energía atraviesa el cuerpo sobre el que incide y pasa a incidir sobre aquellos situados detrás, es decir, se transmite.

La transmisividad ( $\tau$ ) es la fracción de energía incidente que es transmitida por el cuerpo sobre el que incide (flujo de energía transmitida/ flujo de energía incidente).

Lógicamente, cada una de estos tres cocientes deben tener un valor comprendido entre 0 y 1 y debe cumplirse que  $\rho + \tau + \alpha = 1$ .

El porcentaje de radiación que será refleja, absorbe o transmite, depende de la longitud de onda de la energía radiante incidente y de las características del cuerpo sobre el que inciden.

[19]



*Ilustración 2.5 Comportamiento de la radiación en los diferentes objetos de la superficie.*

*Fuente. Guadalupe Galindo Mendoza*

*Recuperado de: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Comportamiento-de-la-radiacion-en-los-diferentes-objetos-de-la-superficie\\_fig21\\_299813785](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Comportamiento-de-la-radiacion-en-los-diferentes-objetos-de-la-superficie_fig21_299813785)*

## **2.7. Índice compuesto de área quemada (Composite Burned Index -CBI-)**

El CBI fue diseñado para evaluar la severidad de un incendio desde un punto de vista ecológico y medir los efectos o el grado de cambio ambiental causado por el fuego (Key y Benson). Además, es capaz de mostrar la heterogeneidad espacial producida y la interacción del fuego con la vegetación y la topografía. [20]

La metodología del CBI parte de un diseño jerárquico, donde el criterio de severidad de cada uno de los estratos de vegetación es evaluado independientemente, dando como resultado un valor numérico continuo, comprendido en un rango entre 0 (en áreas no quemadas o no afectadas) y 3 (en áreas de alta o muy alta severidad). Esta evaluación se realiza sobre un área determinada, denominada parcela de muestreo. Si el índice se va a extrapolar utilizando imágenes de satélite, el tamaño de la parcela deberá estar directamente relacionado con la resolución espacial del sensor a utilizar. [20]

### **2.7.1. Metodología de evaluación del (CBI).**

La metodología consiste en rellenar una planilla estandarizada modificada en base a lo propuesto por Key & Benson (2006), siguiendo una guía de instrucciones. 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. [21] [22]

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. Por lo cual se propone la siguiente categorización: [22] [21]

<b>CBI</b>	<b>Categoría</b>
0-0,25	Sin quemar
0,25-1,25	Baja
1,25-2,25	Moderada
2,25-3	Alta

*Ilustración 2.6 Categorización de los niveles de severidad.*

*Fuente: Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano*

*Recuperado de:*

*[https://www.fcbc.org.bo/wpcontent/uploads/2021/07/2021\\_MetodologiaRegeneracionBSCh-1.pdf](https://www.fcbc.org.bo/wpcontent/uploads/2021/07/2021_MetodologiaRegeneracionBSCh-1.pdf)*

## **2.7.2. Instrucciones para el llenado de planilla CBI (Método Key and Benson).**

### **2.7.2.1. Estructura jerárquica de estratos.**

#### **Sustratos.**

Son los materiales superficiales inertes de suelo, hojarasca, materia orgánica descompuesta y combustibles leñosos caídos.

#### **Hierbas, arbustos bajos y árboles.**

Son todas las gramíneas con hierbas y arbustos con árboles pequeños menor a un metro.

#### **Arbustos y árboles altos.**

Considerar arbustos y árboles de 1–5 m de altura.

#### **Árboles intermedios (tamaño de poste, subdosel).**

Considere arbustos y árboles altos con la copa superior, de aproximadamente 8–15 metros 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 como la del dosel superior, se lo puede clasificar como árbol intermedio.

### **Árboles grandes (maduros, dominantes y codominantes, dosel superior).**

Son 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 con árboles, arbustos altos con árboles. Dosel de árboles intermedios y grandes.

#### **2.7.2.2. Factores de calificación del sustrato.**

##### **Hojarasca y combustible ligero.**

Cantidad relativa consumida de hojas, ramitas y madera menor a 8 cm de diámetro en el suelo al momento del incendio. No considere la nueva hojarasca caída después de la quema. Estimar la hojarasca y 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, la misma se puede observar en la condición de la raíz. Estimar la materia orgánica descompuesta incluso si ocurre debajo de plantas vivas.

##### **Combustible medio.**

Este factor mide principalmente el consumo de combustibles leñosos caídos entre aproximadamente 3 pulgadas (7,6 cm) y 8 pulgadas (20,3 cm) de diámetro. El consumo se basa en el porcentaje de volumen o peso perdido con relación a una muestra que no haya sido quemada.

##### **Combustible grande.**

Incluye el consumo y la carbonización de combustibles leñosos caídos de más de 8 pulgadas (20,3 cm) de diámetro. El consumo se basa en el porcentaje de volumen o peso perdido en relación a una muestra que no haya sido quemada. Este factor puede

combinarse con el combustible medio en caso de que la muestra de uno de ellos en el terreno sea menor al 5%.

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

#### **Porcentaje de follaje alterado.**

Porcentaje de la cubierta de especies leñosas antes del incendio que fue impactada por el fuego según lo estimado por el cambio en la cubierta de verde a marrón o negro. Esto solo se refiere a los arbustos bajos y árboles pequeños antes del incendio

#### **Frecuencia de porcentaje individuos vivos.**

Porcentaje de vegetación anterior al incendio que sigue viva después del incendio. Esta es una medida de supervivencia basada en el número de individuos y no necesariamente en el cambio de cobertura. Incluya hierbas perennes no quemadas y quemadas, arbustos bajos y árboles pequeños en toda la parcela.

Incluya toda la vegetación verde, así como las plantas quemadas que no han tenido suficiente tiempo para rebrotar, pero siguen siendo viables.

#### **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. Este caso se lo puede ver en una evaluación extendida.

#### **Composición de especies y abundancia relativa.**

Cambio en especies o abundancia relativa de especies anticipado dentro de 2 a 3 años después del incendio. ¿Cuánto se parece a la composición de especies post fuego el estrato del incendio? Considere la presencia de especies nuevas o ausencia de las anteriores, además de cómo se extiende el dominio a través de especies.

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

##### **Porcentaje de follaje alterado.**

Porcentaje de follaje antes del incendio para arbustos y árboles altos de 3 a 16 pies (1 a 3 m) que fue impactado por el fuego según lo estimado por el cambio en el volumen de la copa de verde a marrón o negro. Esto incluye faja, chamuscado y soplete de agujas, hojas y tallos. En esta estimación de alteración no se considera el rebrote de la base de arbustos o árboles, solo el follaje pre incendio. En otras palabras, toda la corona ennegrecida y muerta de la parte superior de un arbusto alto cuenta como follaje alterado antes del incendio. En niveles altos de severidad, es evidente el consumo de ramas finas externas en arbustos y árboles.

##### **Cambio porcentual en la cobertura.**

Disminución general en la cobertura de arbustos y 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 calcinación de la cobertura. No incluya retoños o plantas recién germinadas de semillas.

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

Por lo general, para los bosques de coníferas del norte y oeste de los Estados Unidos, la suma de los primeros tres factores (porcentaje inalterado, porcentaje negro y porcentaje marrón) será 100 por ciento. Sin embargo, ese puede no ser el caso en algunos bosques caducifolios o bosques de pinos del sureste, donde las coronas pueden haber sido ennegrecidas o quemadas, pero no muertas y posteriormente rebrotadas. En tales casos, continúe calificando los factores inalterados, negros y marrones tal como aparecen en el sitio, aunque sumen más del 100 por ciento. El balance de los tres factores aún debe mantener calificaciones generales apropiadas para la severidad en el dosel superior.

##### **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 y se muestra en el 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.

### **Porcentaje derribado (derribado).**

Porcentaje de árboles vivos o muertos que ahora yacen en el suelo. Dichos árboles generalmente resultan del lanzamiento del viento después del fuego.

### **2.7.3. Severidad de los incendios forestales.**

La severidad del fuego es comúnmente destacada como un factor crítico en la dinámica de las áreas quemadas. Por su relación directa con la cantidad de biomasa consumida está muy ligada a la recuperación vegetal y la dinámica hidrogeomorfológica post incendio, estableciéndose, de forma general, que la alta severidad está vinculada a tasas de recuperación de la vegetación más bajas y tasas de erosión más elevadas que las áreas de baja severidad. [23]

Se pueden distinguir dos tipos de efectos del fuego, de primer y segundo orden, donde el fuego se lo puede analizar como una perturbación en el crecimiento de la vegetación posterior al incendio. [24]

Los efectos de primer orden están vinculados al impacto inmediato sobre los componentes o condiciones preexistentes, los mismo son resultado directo del proceso de combustión. Estos efectos son referidos como severidad del incendio a corto plazo. [24]

Los efectos de segundo orden están relacionados con la respuesta del ecosistema en términos fundamentalmente de regeneración vegetal como también la erosión causada a los suelos. La evaluación de estos efectos puede atribuirse al crecimiento de la vegetación en varios años, observando las condiciones pre y post incendio. Estos efectos son referidos como severidad del incendio a largo plazo. [24]

Las superficies de las áreas quemadas suelen cubrirse de diferentes materiales en función de cuál haya sido la severidad del fuego. Así, desde el predominio de la vegetación y el suelo en las áreas no quemadas, se observa una progresiva carbonización en los niveles de severidad medios con la aparición de la vegetación quemada, el suelo quemado y el carbón hasta alcanzar, en la alta severidad del fuego, la combustión completa, manifestada a través de la ceniza. La presencia en las superficies quemadas de estas diferentes cubiertas y su distribución espacial ejerce una importante influencia sobre la respuesta del ecosistema a la perturbación del fuego al dirigir los procesos edáficos y de regeneración vegetal [24]. Por lo anterior mencionado mostramos a continuación las características y consecuencias de la vegetación calcinada para cada uno de los niveles de severidad.

Para la severidad nula en la parcela, no existe ningún tipo de daño en la hoja rasca, arbustos y arboles pequeños como también grandes, es decir, la superficie se encuentra intacta, por lo cual, estas áreas cumplirán con normalidad con sus funciones para el crecimiento de nueva vegetación y materia orgánica. No existirá consecuencias del daño para este tipo de severidad.

Para la severidad baja de la parcela, se pueden generar quemaduras hasta un tercio de las copas de los árboles, esto debido a que normalmente la severidad baja se encuentra en los alrededores de la severidad moderada por lo cual el fuego solo afecta parcialmente a los árboles aledaños. Quedan abundantes restos carbonosos de la consunción de la hojarasca y mantillo sobre el suelo mineral intacto, a veces puede haber depósitos de ceniza procedentes de la combustión de la vegetación y de la cubierta orgánica del suelo. No habrá cambios en el suelo mineral y existe presencia de raicillas finas. Para este tipo de severidad existe

consecuencia de inicios de sequedad del suelo provocando una erosión mínima solo en la superficie, pérdida baja de materia orgánica del suelo y poca absorción de agua.

Para la severidad moderada se presentará una calcinación casi total de los árboles, la misma se puede verificar con la base de los árboles, es decir, si se encuentra calcinada o no. Consunción total de la cubierta orgánica del suelo; predomina el color gris y es evidente una deposición abundante de ceniza mineral. Consunción de la materia orgánica del suelo. La pérdida de estructura es muy clara y también la consunción de raicillas en una profundidad inferior o igual a 1 cm. El suelo superficial presenta repelencia total, siendo habitual detectar absorción del agua en los centímetros inmediatamente inferiores a la superficie. Las consecuencias para este tipo de severidad son: bajo grado de erosión en el suelo, bastante pérdida de materia orgánica y minerales del suelo, cambio en las propiedades biológicas de acuerdo a la intensidad del fuego, incremento del PH del suelo provocando la pérdida de minerales.

Para la severidad alta se observa una pérdida total de la vegetación ya sea en hoja rasca, arbustos, arboles pequeños, medianos y grandes. Es normal tener mucho suelo desnudo y mortalidad de árboles y vegetación, ya que el tiempo de permanencia del fuego suelen durar días o incluso semanas. Las consecuencias para este tipo de severidad son: alto grado y posible erosión del suelo, pérdida casi total de la materia orgánica y minerales del suelo, calcinación extrema en los árboles, el suelo puede tardar entre 1 y 5 años en volver a ser fértil, desaparecen especies nativas, aumentan los niveles de CO<sub>2</sub>, se destruyen los nutrientes de la tierra provocando pérdida de fertilidad de los suelos.

## **2.8. Definición de algoritmo.**

Según Alexander Oviedo Fadul un algoritmo es una serie de pasos organizados, que describe el proceso que se debe seguir, para dar solución a un problema específico. El mismo puede estar dado como un conjunto de instrucciones definidas, ordenadas y acotadas con el fin de obtener un producto de bien común para desarrollar una tarea. Es decir, un algoritmo es un procedimiento paso a paso para conseguir un fin. A partir de un estado o datos iniciales, se siguen una serie de pasos ordenados para llegar al producto requerido, no obstante, los algoritmos no son algo exclusivo en el ámbito de las matemáticas, la lógica y la computación,

también se puede considerar como algoritmo a un conjunto de instrucciones que le dan una receta de cocina a una computadora. [25]

También es necesario hacer notar que algunos algoritmos no tienen necesariamente que terminar o resolver un problema en particular. Por ejemplo, una versión modificada de la criba de Eratóstenes, que nunca termine de calcular números primos, no deja de ser un algoritmo. [26]

Los algoritmos pueden ser expresados de muchas maneras, incluyendo al lenguaje natural, pseudocódigo, diagramas de flujo y lenguajes de programación entre otros. Las descripciones en lenguaje natural tienden a ser muy extensas, de tal manera que utilizar pseudocódigo y diagramas de flujo evita muchas ambigüedades y nos ofrece un mejor entendimiento del proceso que sigue el algoritmo.

### **2.8.1. Definición de Algoritmo en Teledetección.**

En el contexto de la Teledetección, un algoritmo se refiere a una serie de pasos o procedimientos bien definidos que se utilizan para procesar y analizar datos obtenidos mediante sensores remotos, como imágenes satelitales o fotografías aéreas, estos algoritmos pueden involucrar técnicas de procesamiento de imágenes, análisis estadístico, aprendizaje automático y otras metodologías para lograr sus objetivos. Los algoritmos de Teledetección están diseñados para extraer información específica de los datos crudos y transformarlos en información más útil y significativa en forma de productos satelitales como ser imágenes que permiten el análisis de vegetación, severidad por quemadura, estado de contaminación de agua a través de clorofila, etc.

Un ejemplo común de un algoritmo en teledetección es el proceso de clasificación de uso del suelo. En este caso, un algoritmo podría tomar una imagen satelital y aplicar técnicas de análisis de patrones para identificar y categorizar diferentes tipos de cobertura del suelo, como áreas urbanas, vegetación, cuerpos de agua, etc.

### **2.9. Procesamiento digital de imágenes satelitales.**

De acuerdo con [27], el propósito del procesamiento digital de imágenes, es el de resaltar elementos que son difíciles de percibir o no se pueden distinguir directamente en una imagen.

En el procesamiento digital de imágenes, normalmente se utilizan varias bandas espectrales de un mismo satélite. Por ejemplo, Landsat TM tiene 7 y SPOT tiene 3. Pero también se puede trabajar en modo multisensorial o multitemporal de modo que el número de bandas puede ser mucho mayor. [17]

Por ejemplo, pueden integrarse datos obtenidos por distintos satélites, de una misma zona.

Cuando se trabaja en modo multibanda se pueden perseguir diferentes objetivos. Por ejemplo: extraer información que sólo puede verse combinando 2 o más bandas espectrales, o reducir la cantidad de datos eliminando la información redundante. [27]

El procesamiento de imágenes digitales requiere software especializado. Existen abundantes programas comerciales y de software libre, tanto de propósito general (GIMP, ImageJ) en procesamiento de imágenes como específicos para imágenes de Teledetección. Un ejemplo de estos últimos, es ICE (Image Composite Editor), sencillo programa usado para la creación de imágenes panorámicas. Evidentemente los programas profesionales ofrecen muchas más prestaciones. Sin embargo, para nuestro estudio haremos uso del software RStudio. [27]

Las funciones básicas de los programas de procesamiento digital de imágenes se pueden resumir en:

**Efectuar composiciones de color RGB** a partir de la combinación de imágenes monocromas.

**Generación de histogramas** para conocer las características espectrales de las imágenes tratadas.

**Efectuar correcciones:** Las imágenes de satélite están sometidas a una serie de interferencias o de errores durante su recepción, que perturban la información que quiere analizarse:

- Fallos en los sensores, generan píxeles incorrectos (corrección radiométrica)
- Alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación y los sensores, generan distorsiones en la imagen global (corrección geométrica)
- Interferencias de la atmósfera, que alteran de forma sistemática los valores de los píxeles (corrección atmosférica).

**Filtrado:** Son métodos para resaltar o suprimir, de forma selectiva, la información contenida en una imagen para destacar algunos de sus elementos, o también para ocultar valores anómalos. En los programas de tratamiento digital de imágenes de propósito general (GIMP, Photoshop) se pueden experimentar los efectos producidos por un gran número de filtros. Otra técnica para aislar información correspondiente a diferentes escalas espaciales es la transformada de Fourier. [27]

### 2.9.1. Operaciones con imágenes digitales:

Se trata de hacer transformaciones simples en las imágenes, aplicando las operaciones matemáticas básicas. Para ello se requiere un mínimo de 2 imágenes de bandas distintas.

Los tipos de operaciones son:

- **Sumas:** La suma de 2 o más bandas espectrales se usa para reducir el ruido propio de la imagen.
- **Diferencias:** Se usan básicamente para detectar cambios, por ejemplo, imágenes tomadas en distintas fechas.
- **Cocientes:** Los cocientes sirven para detectar o acentuar algunas características especiales, como el contenido de hierro en rocas o la vegetación. También se usan para atenuar la influencia del relieve. [27].

### 2.9.2. Correcciones de las imágenes del satélite.

Para poder obtener información de la superficie terrestre y realizar estudios medioambientales a partir de imágenes de Teledetección, previamente es necesario realizar una serie de correcciones o preprocesado de dichas imágenes por lo cual a esta información previamente obtenida dotamos de significado físico a los datos medidos por el sensor. [28].

Las distorsiones y ruidos en las bandas harán que las imágenes ofrezcan artefactos en la vista, muestren ausencias de datos o niveles de color irregulares por la acción de la presencia atmosférica. Esta última parte es una de las más relevantes a la hora de trabajar con nuestras imágenes satélite y conseguir tratar las bandas multispectrales para corregir los valores de reflectividad de los píxeles. [29].

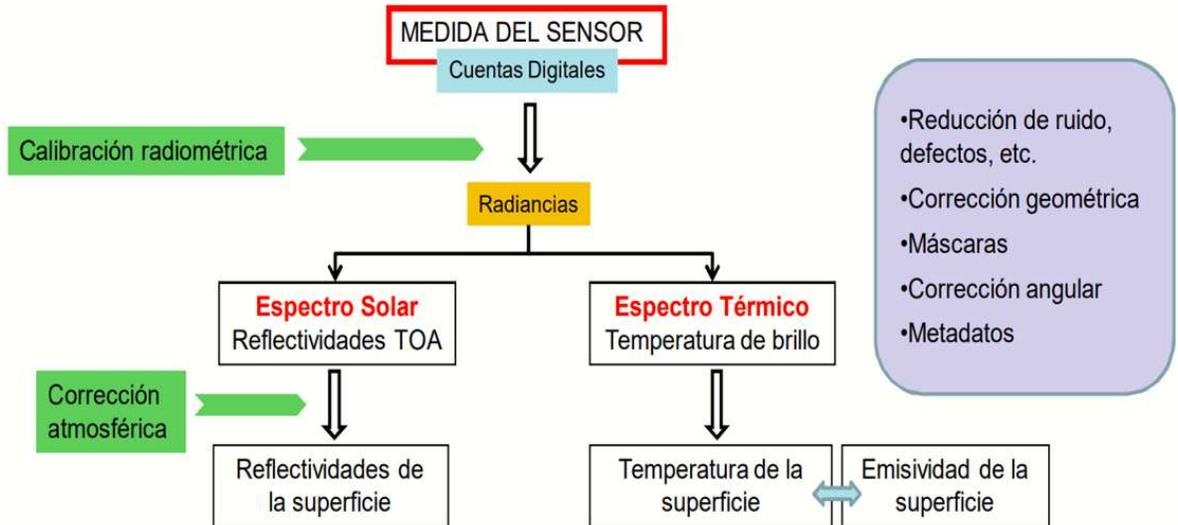


Ilustración 2.7 Diagrama de correcciones en la imagen satelital.  
 Fuente. Juan Carlos Jiménez Muñoz, José A. Sobrino, Guillem Sòria  
 Recuperado de: [https://www.uv.es/ucg/CURSO\\_TD4.pdf](https://www.uv.es/ucg/CURSO_TD4.pdf)

### 2.9.2.1. Corrección geométrica.

Las imágenes digitales proporcionadas por los distintos sensores presentan una serie de distorsiones con respecto a la “imagen real”. La corrección geométrica pretende eliminar esas deformaciones “recolocando” los píxeles, y rellenando los “huecos” existentes. [28].

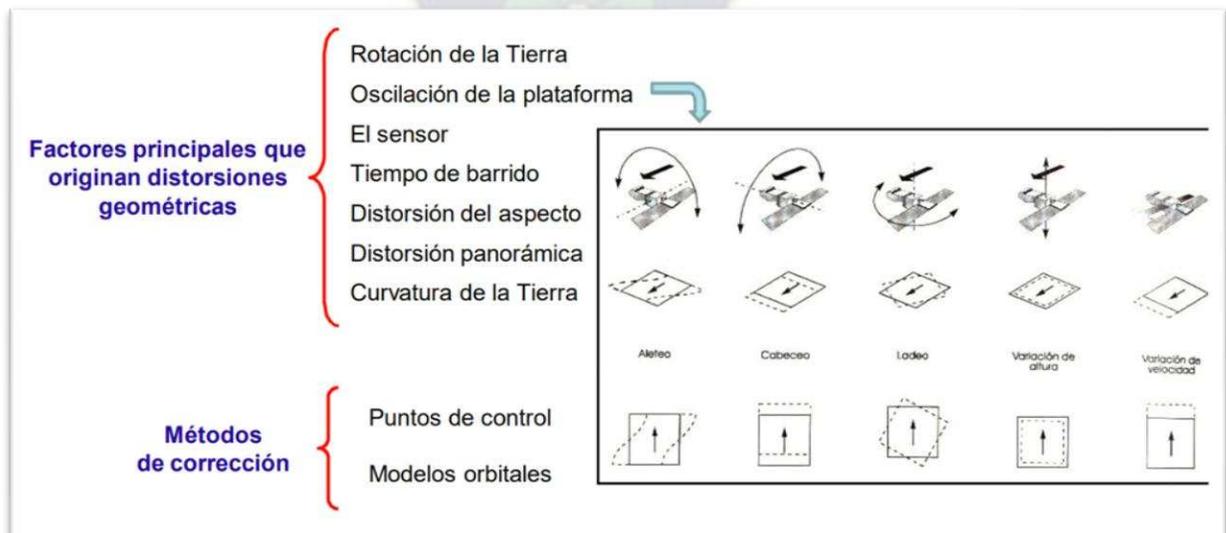


Ilustración 2.8 Factores en las distorsiones geométricas.  
 Fuente. Juan Carlos Jiménez Muñoz, José A. Sobrino, Guillem Sòria.  
 Recuperado de: [https://www.uv.es/ucg/CURSO\\_TD4.pdf](https://www.uv.es/ucg/CURSO_TD4.pdf)

### 2.9.2.2. Corrección radiométrica.

La corrección radiométrica es una de las vías para tratar los valores de píxel de una imagen satélite para obtener valores de intensidad homogéneos equilibrando histogramas o corrigiendo imperfecciones presentes en los píxeles. Entre los diversos motivos que influyen en estas distorsiones de las imágenes satélite encontramos fallos de los propios sensores, alteraciones en el movimiento del sensor o instrumento a bordo del satélite/avioneta o la interferencia de la atmósfera. [28].

En diferentes casos podemos encontrar artefactos de manera aleatoria en los píxeles donde, valores de celdas se encuentran asignados de manera errónea. Un fenómeno similar al que ocurre dentro de los Modelos Digitales de Elevación y la presencia de sumideros. A estas zonas aleatorias se les puede asignar el valor medio de las celdas contiguas, como en el siguiente ejemplo: [29].

15	18	17	18	22	31
15	16	18	19	21	28
19	17	19	20	23	25
26	19	24	118	27	24
31	23	29	32	33	28
33	35	33	36	34	30

15	18	17	18	22	31
15	16	18	19	21	28
19	17	19	20	23	25
26	19	24	25	27	24
31	23	29	32	33	28
33	35	33	36	34	30

*Ilustración 2.9 Corrección radiométrica de un píxel.*

*Recuperado de: <http://www.gisandbeers.com/correccion-radiometrica-imagenes-satelite/>*

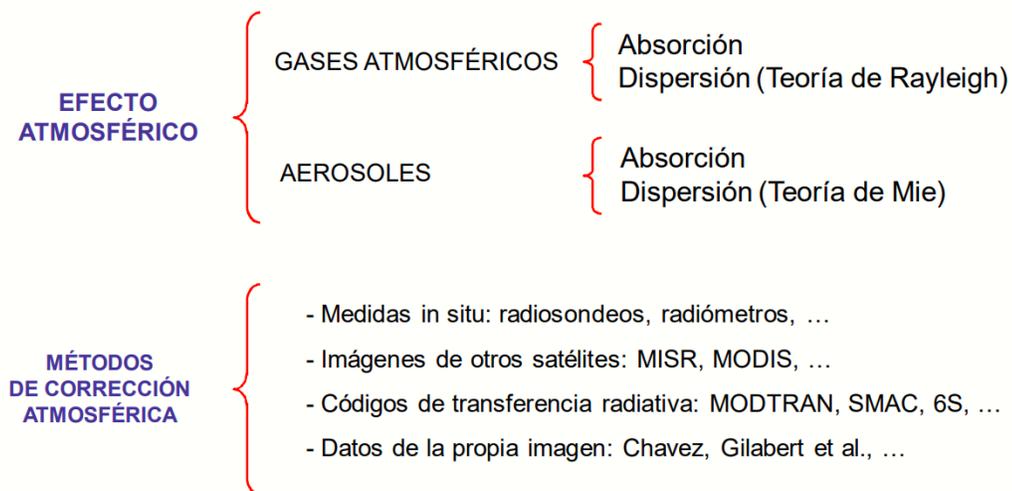
Como se observa los datos no concordantes en los píxeles de la imagen fueron reemplazados por un valor medio del conjunto en general, este método igual se puede aplicar a otros tipos de errores como pérdida de filas y columna de píxeles.

### 2.9.2.3. Corrección atmosférica.

Por corrección atmosférica se entiende, en general, el proceso mediante el cual es eliminada de la señal detectada por el sensor la perturbación producida por la atmósfera.

La corrección atmosférica es un proceso que se aplica a las imágenes digitales, con el propósito de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen, como producto de la interacción del sensor con la atmósfera. [30]

Según CHUVIECO [7], indica que la radiación electromagnética se ve afectada por los distintos componentes de la atmósfera. Por ello, finalmente la distancia detectada por este no corresponde exactamente a la parte de la superficie terrestre, sino que cuenta con un porcentaje añadido, a consecuencia del efecto disperso de la atmósfera. [7]

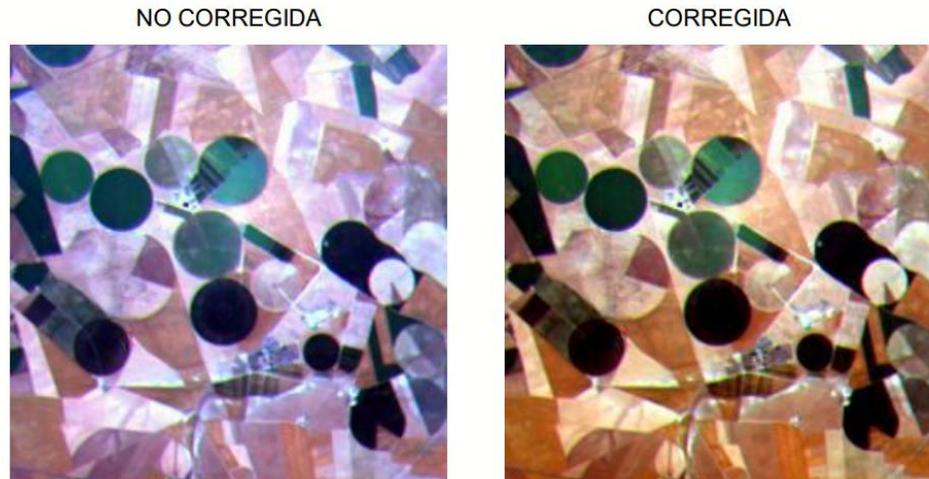


*Ilustración 2.10 Efectos de la atmósfera y proceso de corrección atmosférica.*

*Autor: Juan Jiménez, José Sobrino, Guillem Soria.*

*Recuperado de: [https://www.uv.es/ucg/CURSO\\_TD4.pdf](https://www.uv.es/ucg/CURSO_TD4.pdf)*

Ejemplo: Comparación entre una imagen en la que no se ha realizado la corrección atmosférica y una imagen en la que sí se ha corregido este efecto.



*Ilustración 2.11 Imágenes del sensor POLDER tomadas sobre la zona de Barrax (Albacete). Composición en falso color RGB.  
Fuente. Juan Carlos Jiménez Muñoz, José A. Sobrino, Guillem Sòria.  
Recuperado de: [https://www.uv.es/ucg/CURSO\\_TD4.pdf](https://www.uv.es/ucg/CURSO_TD4.pdf)*

Como se observa en la ilustración NO CORREGIDA, se aprecia que la banda azul se encuentra afectada por la atmósfera por lo cual presenta un tono más azul, entonces con la corrección a la banda determinada se puede obtener la imagen CORREGIDA.

### **2.9.3. Correcciones extras aplicadas en el procesamiento de imágenes.**

En el momento de trabajar los datos se pueden aplicar diferentes métodos como: tipos de clasificación, correlación o análisis de regresión, los cuales serán utilizados en base al requerimiento del tipo de estudio. Sin embargo, es necesario mencionar los más utilizados en estudios similares.

#### **2.9.3.1. Análisis de regresión lineal.**

La regresión lineal es una técnica de análisis de datos que predice el valor de datos desconocidos mediante el uso de otro valor de datos relacionado y conocido. Modela matemáticamente la variable desconocida o dependiente y la variable conocida o independiente como una ecuación lineal, los modelos de regresión lineal son relativamente simples y proporcionan una fórmula matemática fácil de interpretar para generar predicciones. [31]

### **2.9.3.2. Matrices de correlación.**

Una matriz de correlación es una tabla que indica los coeficientes de conexión entre los factores. Cada celda de la tabla muestra la conexión entre los dos factores. Una tabla de conexión se utiliza para esbozar información, como contribución a una investigación más desarrollada y como indicativo para exámenes de vanguardia. La tabla muestra una lista multivariable horizontalmente y la misma lista verticalmente y con el correspondiente coeficiente de correlación llamado “r” o la relación entre cada pareja en cada celda, expresada con un número que va desde 0 a 1. El modelo mide y muestra la interdependencia en relaciones asociadas o entre cada pareja de variables y todas al mismo tiempo. [32]

### **2.9.3.3. Análisis de correlaciones bivariadas.**

La correlación bivariada es una técnica estadística destinada a averiguar:

- a) Si dos variables tienen relación entre sí
- b) Si la relación es fuerte-moderada-o débil y qué dirección tiene la relación

Las coincidencias muchas veces esconden asociaciones entre fenómenos. La correlación es la técnica más usada para medir asociación lineal en todas las ciencias. Indica asociación o relación entre dos variables, no implica causalidad.

La correlación está basada en la asociación lineal, es decir, que cuando los valores de una variable aumentan los valores de la otra variable pueden aumentar o disminuir proporcionalmente. [31]

### **2.9.3.4. Matrices de confusión.**

En el campo de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático una matriz de confusión es una herramienta que permite visualizar el desempeño de un algoritmo de aprendizaje supervisado. Cada columna de la matriz representa el número de predicciones de cada clase, mientras que cada fila representa a las instancias en la clase real. Es decir, en términos prácticos nos permite ver qué tipos de aciertos y errores está teniendo nuestro modelo a la hora de pasar por el proceso de aprendizaje con los datos. [33]

### **2.9.3.5. Regresión de Vectores de Soporte (SVR, Support Vector Regression).**

La Regresión de Vectores de Soporte (SVR, del inglés Support Vector Regression) es un algoritmo de regresión basado en los mismos algoritmos que usan las Máquinas de Vectores de Soporte (SVM, del inglés Support Vector Machines) para la creación de modelos de clasificación. [34]

El algoritmo de Vectores de Soporte Regresión se basa en buscar la curva o hiperplano que modele la tendencia de los datos de entrenamiento y según ella predecir cualquier dato en el futuro, dado que la salida es un número real. [35]

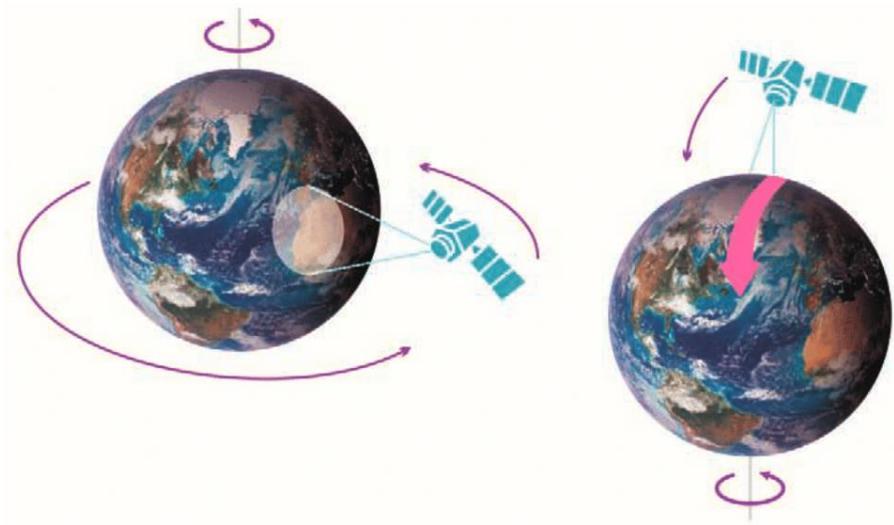
Es necesario mencionar que existen varios métodos los cuales no son mencionados, sin embargo, se hará un análisis de estos métodos para determinar el más adecuado, basándonos en nuestra área de estudio y el tipo de terreno.

## **2.10. Tipos de satélites utilizados en Teledetección.**

### **2.10.1. Características orbitales de los satélites de Teledetección.**

Se denomina órbita a la trayectoria seguida por un satélite alrededor de la Tierra. Ésta depende de las características y objetivos de los sensores que van a bordo del satélite. En general, las órbitas quedan definidas por la altitud, orientación y rotación con respecto a la Tierra. [36]

Las órbitas geoestacionarias son aquellas que describen los satélites que están situados a grandes alturas y siempre ven la misma porción de superficie terrestre (Ilustración 2.13). Su altura suele ser de 36.000 km y se mueven a una velocidad angular igual a la de la rotación de la Tierra, por lo que siempre permanecen en la misma posición relativa respecto a la superficie terrestre. Satélites meteorológicos como el METEOSAT tienen este tipo de órbitas. Sin embargo, la mayor parte de los satélites de Teledetección se diseñan para seguir una órbita cuasi polar que va de norte a sur, la cual, en conjunción con la rotación de la Tierra (de oeste a este), les permite cubrir la mayor parte de la superficie terrestre durante un cierto periodo de tiempo. [36]



*Ilustración 2.12 Órbita GEOESTACIONARIA y órbita CUASI POLAR.  
Fuente. Satélites de Teledetección para la gestión del territorio.  
Recuperado de: <https://www.researchgate.net/directory/publications>*

Además, muchos de los satélites de órbita cuasi polar también son helio sincrónicos, ya que cubren la misma área del mundo a una hora local fija del Características orbitales de los satélites de Teledetección día, llamada hora solar local. Esto significa que, a una latitud dada, la posición del Sol en el cielo, al igual que la posición del satélite que pasa por encima, será aproximadamente la misma dentro de la misma estación del año. Este hecho asegura condiciones de iluminación similares cuando se adquieren imágenes en una estación específica durante diferentes años. [36]

### **2.10.2. Resolución de los sensores remotos.**

Los sensores instalados en los satélites de Teledetección poseen una serie de particularidades que determinan las características de las imágenes que van a proporcionar. Estas características vienen definidas básicamente por diferentes tipos de resolución:

#### **2.10.2.1. Resolución espacial.**

Este concepto designa al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen. Está determinada por el tamaño del píxel, medido en metros sobre el terreno, esto depende de la altura del sensor con respecto a la Tierra, el ángulo de visión, la velocidad de escaneado y las características ópticas del sensor.

Por ejemplo, las imágenes Landsat TM, tienen una resolución espacial de 30x30 m en las bandas 1,2,3,4, 5 y 7 y de 120x120m en la 6 (térmica). El sensor SPOT - HRV tiene una resolución de 10x10m, mientras que los satélites meteorológicos como NOAA, el píxel representa un tamaño desde 500 a 1100m de lado. [27]

#### **2.10.2.2. Resolución espectral.**

Consiste en el número de canales espectrales (y su ancho de banda) que es capaz de captar un sensor. Por ejemplo: SPOT tiene una resolución espectral de 3, Landsat de 7. Los nuevos sensores, llamados también espectrómetros o hiper espectrales llegan a tener hasta 256 canales con un ancho de banda muy estrecho (unos pocos nm) para poder separar de forma precisa distintos objetos por su comportamiento espectral. [27]

#### **2.10.2.3. Resolución radiométrica.**

Se la llama a veces también resolución dinámica, y se refiere a la cantidad de niveles de gris en que se divide la radiación recibida para ser almacenada y procesada posteriormente. Esto depende del conversor analógico digital utilizada.

Así por ejemplo Landsat MSS tiene una resolución espectral de  $2^6= 64$  niveles de gris en el canal 6, y Landsat MSS en las bandas 4 a 7 de  $2^7= 128$  niveles de gris, mientras que en Landsat TM es de  $2^8 = 256$ . Esto significa que tenemos una mejor resolución dinámica en el TM y podemos distinguir mejor las pequeñas diferencias de radiación. [27]

#### **2.10.2.4. Resolución temporal.**

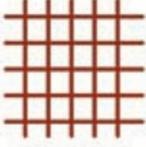
Es la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre. Es decir, cada cuanto tiempo pasa el satélite por la misma zona de la Tierra. Este tipo de resolución depende básicamente de las características de la órbita.

El ciclo de repetición de los Landsat-1 al Landsat -3 era de 17 días. A partir del Landsat 4 en 1984 el ciclo de repetición se redujo a 15 días. SPOT permite un ciclo de repetición de entre 3 y 26 días. [27]

### 2.10.3. Satélites de Teledetección y sus características.

Según datos extraídos de la Union of Concerned Scientists, hay más de 900 satélites orbitando la Tierra, de los que la mayoría, aproximadamente un 60%, son de comunicaciones. Los satélites de Teledetección son aproximadamente unos 120. Todos los años son varios los satélites de este tipo que se lanzan al espacio y otros tantos los que dejan de estar operativos, por lo que su número varía permanentemente. [36]

Para un mejor entendimiento, cada satélite incluye un encabezado que describe de forma esquemática las principales características que lo definen.

	Indica el nombre del sensor que utiliza, en el caso de muchos satélites, al ser sólo uno, se ha optado por indicar el nombre del propio satélite. En el caso de satélites con varios sensores se añaden varias casillas, una por cada sensor.
	Indica la resolución espacial que proporciona el sensor. Esta puede variar dependiendo del ángulo de visión del satélite, por lo que se muestra la máxima posible en la vertical de paso de la órbita (nadir). En el caso de satélites que tienen varios sensores, se especifica la resolución espacial de cada uno de ellos.
	Indica el número de bandas espectrales que proporciona el sensor
	Indica la resolución temporal del sensor. Este dato es relativamente ambiguo, ya que esta característica varía dependiendo de la latitud y del ángulo con que se “fuerce” al satélite a adquirir la imagen. Por lo tanto, el dato que aparece es orientativo y tiene como finalidad que el lector se haga una idea de la periodicidad potencial del satélite para cubrir una misma zona.

### 2.10.3.1. DMC (Disaster Monitoring Constellation).

Es una constelación de satélites de Teledetección de múltiples nacionalidades, inicialmente concebida para el seguimiento de catástrofes naturales, con una cobertura de más de una visita diaria a cualquier punto del globo. Dicho periodo de revisita permite su utilización en multitud de aplicaciones y campos. [22]

Los satélites de la constelación han sido diseñados y construidos por la compañía británica Surrey Satellite Technology Ltd. (SSTL), y según su nacionalidad son operados por instituciones o compañías diferentes. Las compañías que operan estos satélites conforman un consorcio en el que las imágenes obtenidas por cada uno de ellos están a disposición del resto. [22]

En la actualidad la constelación está conformada por los satélites que se muestran en la siguiente tabla:

Sensores	Resolución espacial	Nº bandas	Resolución temporal
			
SLIM-6	32 m	3	< 1 día
SLIM-6-22	22 m	3	< 1 día

Tabla 2.2 Características Satélite DMC.

Fuente. Satélites de Teledetección para la gestión del territorio.

Recuperado de: <https://www.researchgate.net/directory/publications>

Satélite	País	Lanzamiento
ALSAT-1	Argelia	28-11-2002
NIGERIASAT-1	Nigeria	27-09-2003
UK-DMC	Reino Unido	27-09-2003
BEIJING-1	China	27-10-2005
DEIMOS-1	España	29-07-2009
UK-DMC2	Reino Unido	29-07-2009

Tabla 2.3 Satélites operativos de la DMC.  
Fuente. Satélites de Teledetección para la gestión del territorio.  
Recuperado de: <https://www.researchgate.net/directory/publications>

### 2.10.3.2. EARTH OBSERVING – 1 (EO-1)

Satélite experimental de la NASA del denominado “New Millennium Program” (NMP) lanzado el 21 de noviembre de 2000. En él se han probado y validado nuevas tecnologías para aplicar en futuras misiones continuadoras del programa LANDSAT, con el fin de reducir los altos costes actuales. A efectos de poder comparar espacial y temporalmente las imágenes obtenidas, la órbita de EO-1 se ha diseñado de tal modo que pase 1 o 2 minutos después del LANDSAT-7. El satélite orbita a una altitud de 705 km. [22]

Sensores	Resolución espacial	Nº bandas	Resolución temporal
ALI	MS: 30 m PAN: 10 m	9	16
HYPERION	30 m	220	16

Tabla 2.4 Características Satélite EARTH OBSERVING – 1 (EO-1)  
Fuente. Satélites de Teledetección para la gestión del territorio.  
Recuperado de: <https://www.researchgate.net/directory/publications>

El satélite lleva a bordo los siguientes sensores:

**ALI (Advanced Land Imager).** Sensor multiespectral igual al ETM+ de LANDSAT-7, con

la diferencia de poseer 10 bandas (ETM+ posee 7), que abarcan el mismo ancho del espectro, con una resolución espacial de 30 metros. Una de estas bandas corresponde al canal pancromático (480-690 nm), con una resolución espacial de 10 metros. El ancho de barrido es de 37 km y tiene una capacidad de visión lateral de hasta 15°. [22]

**HYPERION.** Sensor hiperespectral que dispone de 220 bandas que van desde los 400 hasta los 2.500 nm, cada una con un ancho espectral de 10 nm y 30 metros de resolución espacial. El ancho de barrido es de 7,7 km. [22]

### 2.10.3.3. LANDSAT.

El programa Landsat se inició en 1972 con el lanzamiento del Landsat-1. En 2021 se lanzó el más reciente Landsat-9. Landsat-5 fue lanzado en 1984, y es el satélite de Teledetección que más tiempo lleva en órbita operativo. [27]

Los satélites Landsat disponen de dos sensores, **MSS** (*Multispectral scanner*) y **TM** (*Thematic mapper*). El sensor TM tiene mayor resolución radiométrica (8 bits) que el MSS (6 bits). [27]

El satélite Landsat-7 incorpora el sensor **ETM** (*Enhanced Thematic Mapper*) que añade a las bandas ya disponibles en el TM, un canal pancromático con resolución espacial de 15 metros. Su órbita se sitúa a 705 Km de altitud, y sobrevuela la misma zona cada 16 días. [27]

MODO ESPECTRAL	ESPACIAL (metros)	ESPECTRAL (micras)		RADIOMÉTRICA	TEMPORAL
Pancromática	15	Banda 8. Pancromática	0.52 - 0.90	8 BITS	16 Días
Multiespectral	30	Banda 1. Azul	0.45 - 0.52		
		Banda 2. Verde	0.53 - 0.61		
		Banda 3. Roja	0.63 - 0.69		
		Banda 4. Infrarrojo cercano1	0.78 - 0.90		
		Banda 5. Infrarrojo cercano2	1.55 - 1.75		
		Banda 6. Infrarrojo medio	2.09 - 2.35		

*Tabla 2.5 Diferentes resoluciones del satélite Landsat-7*  
*Fuente. Aspectos técnicos de las imágenes Landsat*  
*Recuperado de: <https://www.researchgate.net/directory/publications>*

## Sensores RBV, MS, TM y ETM+

Los canales y sus aplicaciones	BANDAS	BANDA ESPECTRAL (um)	APLICACIONES
	1	0,45-0,52 (azul)	Mapeo de aguas costeras. Diferenciación entre suelo y vegetación. Diferenciación entre vegetación conifera y decidua.
	2	0,52-0,60 (verde)	Mapeo de vegetación. Calidad de agua.
	3	0,63-0,90 (rojo)	Absorción de la clorofila. Diferenciación de especies vegetales. Áreas urbanas y uso del suelo. Agricultura. Calidad de agua.
	4	0,76-0,90 (infrarrojo cercano)	Delimitación de cuerpos de agua. Mapeo geomorfológico y geológico. Identificación de áreas de incendios y áreas húmedas. Agricultura y vegetación.

Tabla 2.6 Características de los sensores 1-4 del Landsat 7

Fuente. Aspectos técnicos de las imágenes Landsat

Recuperado de: <https://www.researchgate.net/directory/publications>

## Sensores RBV, MS, TM y ETM+

Los canales y sus aplicaciones	BANDAS	FAJA ESPECTRAL (um)	APLICACIONES
	5	1,55-1,75 (infrarrojo termal)	Uso del suelo. Medición de la humedad en la vegetación. Diferenciación entre nubes y nieve. Agricultura. Vegetación.
	6	10,40-12,50 (infrarrojo termal)	Mapeo de stress térmico en plantas. Corrientes marinas. Propiedades termales del suelo.
	7	2,08-2,35 (infrarrojo medio)	Identificación de minerales. Mapeo hidrotermal.

Tabla 2.7 Características de los sensores 5-7 del Landsat 7

Fuente. Aspectos técnicos de las imágenes Landsat

Recuperado de: <https://www.researchgate.net/directory/publications>

El 11 de febrero de 2013, el vehículo Atlas-V que transporta el satélite LDCM (Landsat Data Continuity Mission) fue lanzado desde el buque USS Vandenberg. La nave fue diseñada para continuar el programa de captura global de imágenes espaciales que los Estados Unidos han estado implementando desde 1972 con la ayuda de la serie Landsat. [37]

El equipo de detección remota instalado en la LCDM incluye un radiómetro de barrido multicanal OLI (Operational Land Imager) y un radiómetro infrarrojo de dos canales TIRS (Thermal Infrared Sensor). El instrumento OLI, desarrollado por Ball Aerospace & Technologies, opera en nueve longitudes de onda en el rango de 0.433-2.300 $\mu\text{m}$  y proporciona imágenes con una resolución máxima de 15m utilizando avanzadas tecnologías de imágenes espaciales. Para su desarrollo se utilizó el satélite experimental EO-1 (lanzado en el año 2000 y equipado con el radiómetro Advanced Land Imager, un prototipo del radiómetro OLI). [37]

La resolución espacial de las imágenes obtenidas con el instrumento TIRS es de 100m. Su objetivo principal es obtener las características de temperatura de la superficie y estudiar el proceso de transferencia de calor y humedad en el ámbito de la agricultura, la gestión del agua, etc. [37]



Sensor	Band number	Nombre de la banda	Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	Resolution (m)	Band Applications
OLI	1	Costera (Coastal)	0.43 – 0.45	30	Estudios costeros y de aerosoles
OLI	2	Azul	0.45 – 0.51	30	Cartografía batimétrica, que distingue el suelo de la vegetación y la vegetación caducifolia de la vegetación de coníferas
OLI	3	Verde	0.53 – 0.59	30	Destaca los picos de máxima vegetación, que son útiles para evaluar el vigor de las plantas
OLI	4	Roja	0.63 – 0.67	30	Distingue las laderas de vegetación
OLI	5	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85 – 0.88	30	Destaca el contenido de biomasa y las costas
OLI	6	Infrarrojo de Onda Corta 1 (SWIR 1)	1.57 – 1.65	30	Distingue la humedad del suelo y de la vegetación; penetra a través de nubes finas
OLI	7	Infrarrojo de Onda Corta 2 (SWIR 2)	2.11 – 2.29	30	Mejora de la lectura de la humedad del suelo y la vegetación y la penetración a través de nubes finas
OLI	8	Pan	0.50 – 0.68	15	15 meter resolution, sharper image definition
OLI	9	Cirrus	1.36 – 1.38	30	Improved detection of cirrus cloud contamination
TIRS	10	TIRS 1	10.60 – 11.19	30 (100)	100 meter resolution, thermal mapping and estimated soil moisture
TIRS	11	TIRS 2	11.50 – 12.51	30 (100)	100 meter resolution, thermal mapping and estimated soil moisture

*Tabla 2.8 Características del satélite Landsat 8  
Fuente: EOS Data Analytics  
Elaboración Propia*

#### **2.10.3.4. SPOT-5**

El programa francés SPOT (Systeme Probatoire d'Observation de la Terre), aprobado en 1978, y desarrollado por el CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), en colaboración con Bélgica y Suecia, ha dado fruto a un total de 5 satélites de uso civil hasta la actualidad. El primer satélite de la serie (SPOT-1) fue lanzado el 22 de febrero de 1986. En la actualidad se mantienen operativos SPOT-4 (lanzamiento el 24 de marzo de 1998) y SPOT-5 (lanzamiento el 4 de mayo de 2002).

El inicio del programa SPOT representó, en su momento, un salto tecnológico para la observación de la Tierra al generar imágenes de una resolución espacial inédita hasta la fecha para un satélite civil (10 m/píxel). Los satélites SPOT, que en la actualidad son operados por Astrium GEO-Information, tienen programada su continuidad con la puesta en órbita de SPOT-6 y SPOT-7, con fechas de lanzamiento previstas para 2012 y 2013 respectivamente. El satélite orbita a una altura de 822 km sobre la superficie terrestre.

#### **Sensores**

SPOT-5 puede tomar imágenes multiespectrales dentro de un corredor de hasta 900 km de anchura. El satélite lleva a bordo los siguientes sensores: HRG (High Resolution Geometric): Sensor óptico de alta resolución que dispone de 4 bandas multiespectrales y una pancromática. El satélite posee dos de estas unidades, las cuales pueden efectuar observaciones oblicuas. Los dos instrumentos HRG pueden funcionar independiente o simultáneamente en modo pancromático o multiespectral. El ancho de barrido de cada sensor es de 60 km, por lo que cuando ambos operan simultánea y coordinadamente pueden tomar un ancho de barrido de 120 km. Asimismo, pueden orientarse lateralmente hasta un ángulo máximo de 27°. •HRS (High Resolution Stereoscopic): Sensor dedicado a la adquisición simultánea de pares estereoscópicos, en un corredor de 120 km de ancho por un máximo de 600 km de largo, con una banda espectral pancromática (490-690 nm) de 10 m de resolución espacial. El sensor tiene un ángulo de visión delantero/trasero de  $\pm 20^\circ$ .

Banda	Región espectral	Ancho de banda (nm)	Resolución (m)
	Pancromático	480-710	2,5 (modo súper) ó 5
1	Verde	500-590	10
2	Rojo	610-680	
3	Infrarrojo cercano	780-890	
4	Infrarrojo medio	1580-1750	

Tabla 2.9 Bandas espectrales del sensor HRG

Fuente. Satélites de Teledetección para la gestión del territorio.

Recuperado de: <https://www.researchgate.net/directory/publications>

### 2.10.3.5. TERRA (EOS-AM 1)

TERRA es un satélite científico puesto en órbita por la NASA el 18 de diciembre de 1999, en el que han participado las agencias espaciales de Estados Unidos, Japón y Canadá. El objetivo principal de este satélite es el estudio de los ciclos del carbono y de la energía, contribuyendo así a analizar la “salud” del planeta Tierra en su conjunto. TERRA fue el primer satélite del programa EOS (Earth Observing System), que consiste en un sistema integral de monitorización de la Tierra por medio de una serie de satélites de órbitas polares sincronizadas, que llevan a cabo observaciones a nivel global de la superficie terrestre, la atmósfera y los océanos. El satélite TERRA posee varios sensores, aunque sólo el sensor ASTER, que proporciona imágenes con una resolución espacial entre 15 y 90 m/píxel, será descrito en esta publicación. El satélite orbita a 705 km de altura.

Sensores	Resolución espacial	Nº bandas	Resolución temporal
ASTER	15 a 90 m	14	16 días

Tabla 2.10 Características Satélite Terra

Fuente. Satélites de Teledetección para la gestión del territorio.

Recuperado de: <https://www.researchgate.net/directory/publications>

### 2.10.3.6. Sentinel 2.

El satélite Sentinel 2 se encuentra activo desde el año 2015, momento en el que fue lanzado el primer satélite S-2A y cuya recurrencia de imágenes se duplicó tras el lanzamiento del segundo satélite S2B en 2017. [29]

Las imágenes Sentinel 2 son proporcionadas por los “gemelos” Sentinel 2A y Sentinel 2B, con una resolución de 10 metros en el visible y disponibles para descarga de manera gratuita. Con sus 13 bandas de trabajo puedes realizar filtros a color natural y falso color o componer índices espectrales a máxima resolución. [29]

La flota de Sentinel 2 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. [29]

	SENTINEL 2	
	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	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

Tabla 2.11 Bandas espectrales del Satélite Sentinel 2

Fuente. Gis and Beers.

Recuperado de: <http://www.gisandbeers.com/lo-deberias-saber-imagenes-sentinel-2/>

## **Características de bandas**

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 de mapeo entre ambos es ligeramente diferente. No te preocupes, no te darás cuenta de ello. 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. [29]

### **2.11. Rango histórico del Satélite Landsat.**

Con satélites en órbita desde 1972, el programa Landsat es el más antiguo de observación de la Tierra. El programa de imágenes de la Tierra, que se creó inicialmente para investigar las masas terrestres de nuestro planeta, ha contribuido desde entonces a una gran variedad de temas. [38]

Desde las primeras imágenes del satélite Landsat 1 en 1972, se han lanzado múltiples satélites Landsat con la capacidad de tomar imágenes cada vez más detalladas de nuestro mundo. En los últimos 50 años de funcionamiento del programa de satélites Landsat, se han adquirido más de 10 millones de imágenes de la Tierra por satélite. [38]

Estas dos imágenes muestran la mejora en la resolución de la imagen y la calidad del sensor de datos en las imágenes Landsat del Valle del Silicio, que se encuentra en el norte de California. La foto de la izquierda es una imagen Landsat 1 adquirida en 1972 y la de la izquierda es una imagen Landsat 8 adquirida en 2016. [38]



*Ilustración 2.13 Imágenes del satélite Landsat 1 (izquierda) de 1972 e imágenes del satélite Landsat 8 (derecha) de 2016 del Valle del Silicio en el norte de California.*

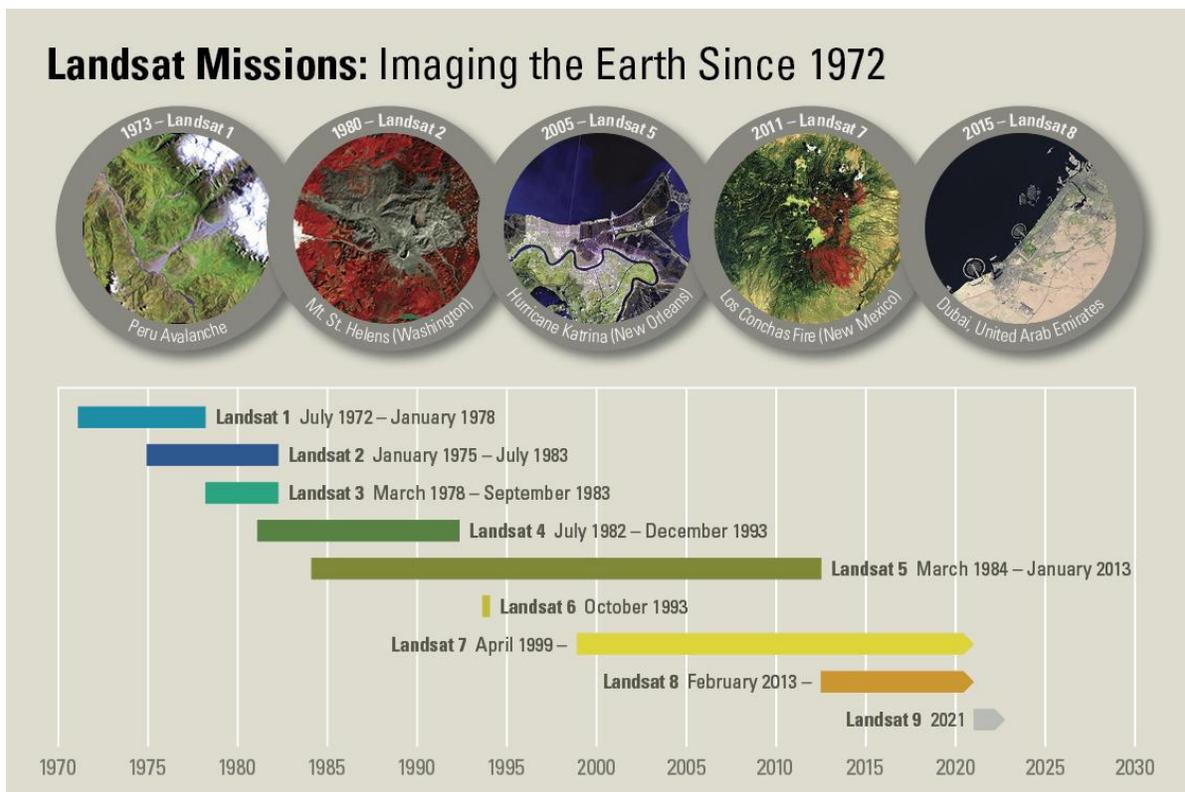
*Fuente: Science For a Changing World (USGS)*

*Recuperado de: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-1>*

### **2.11.1. Cronología de los Satélites Landsat a lo largo de los años.**

Cada satélite comisionado llevó la herencia histórica del programa. Los lanzamientos de Landsat 2, Landsat 3 y Landsat 4 siguieron en 1975, 1978 y 1982, respectivamente. Cuando Landsat 5 se lanzó en 1984, nadie podría haber predicho que el satélite entregaría datos globales de alta calidad de las superficies terrestres de la Tierra durante 28 años y 10 meses. Esto estableció oficialmente un nuevo récord mundial Guinness para el "satélite de observación de la Tierra de mayor duración". Landsat 6 no pudo alcanzar la órbita en 1993. Como resultado de la misión perdida, el satélite no está incluido en los conteos exitosos de Landsat. El resto de los satélites Landsat han tenido lanzamientos y recopilación de datos exitosos: Landsat 7 en 1999, Landsat 8 en 2013 y Landsat 9 en septiembre de 2021. Todos los satélites Landsat se lanzaron desde la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg, redestinada como Base de la Fuerza Espacial Vandenberg en mayo de 2021. [39]

El legado perdurable del Proyecto EROS continúa con el programa Landsat hasta el día de hoy. La información recopilada por múltiples satélites de observación de la Tierra, como Landsat, ahora sirve como un registro común y confiable para el cambio ambiental en todo el mundo. De hecho, en el último medio siglo, el registro de la observación de la Tierra desde el espacio se ha convertido en la base indispensable de casi todas las deliberaciones sobre el estado del planeta. La visión del secretario Udall ha rehecho fundamentalmente cómo vemos y entendemos nuestro planeta. [39]



*Ilustración 2.14 Cronología de los Satélites Landsat a lo largo de los años.  
Fuente: Science For a Changing World (USGS)  
Recuperado de: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>*

### 2.11.1.1. Landsat 1

El primer satélite Landsat se lanzó el 23 de julio de 1972 y se denominó originalmente Satélite de Tecnología de los Recursos de la Tierra (ERTS-1). Originalmente diseñado para estar en el espacio durante un año, Landsat 1 duró seis años antes de ser retirado del servicio el 6 de enero de 1978 [39]. Algunos datos sobre el Landsat 1 son:

- Tuvo un ciclo de repetición de 18 días con un tiempo de cruce ecuatorial de 9:30 am +/- 15 minutos.
- Resolución de 80 metros-suelo.

Tres cámaras operando en las siguientes bandas espectrales:

- Banda 1 Azul-verde visible (475-575 nm)
- Banda 2 Naranja-rojo visible (580-680 nm)
- Banda 3 Rojo visible a infrarrojo cercano (690-830 nm)



*Ilustración 2.15 El satélite Landsat 1 (ERTS-1).  
Fuente: Science For a Changing World (USGS)  
Recuperado de: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-1>*

#### **2.11.1.2. Landsat 2**

El 22 de enero de 1975, Landsat 2 fue puesto en órbita como Satélite Tecnológico de Recursos Terrestres B (ERTS-B) antes de ser rebautizado. Al igual que el Landsat 1, el

Landsat 2 tenía un diseño de vida útil de un año, pero duró siete años antes de ser retirado del servicio el 27 de julio de 1983. [39]

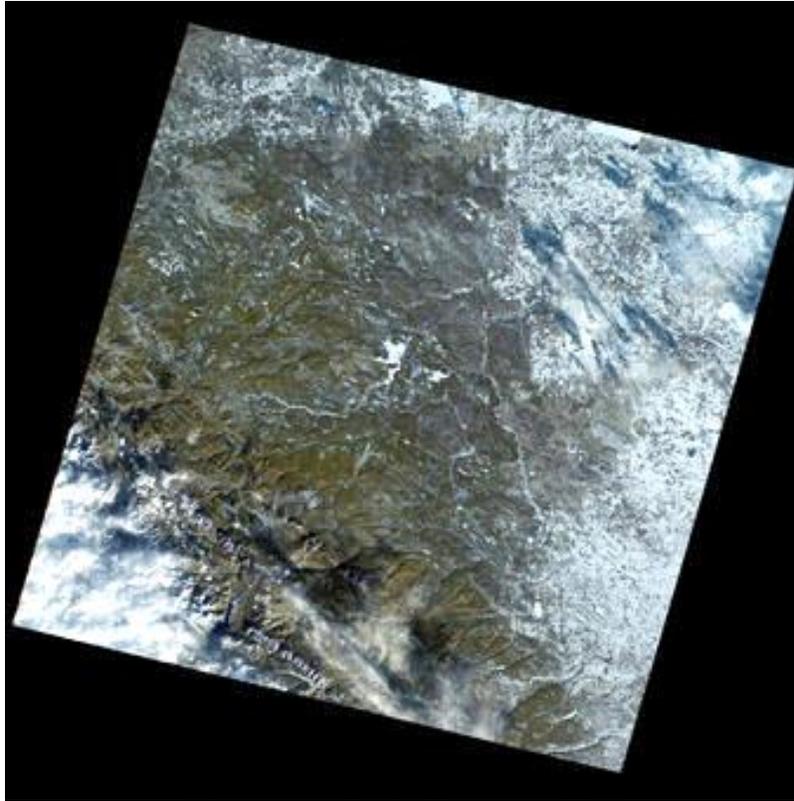
En lugar de que solo los investigadores principales usaran los datos que ocurrieron durante Landsat 1 y el LPIP, un experimento cooperativo de inventario agrícola comenzó a monitorear cultivos en todo el mundo. Usando los datos de Landsat, los científicos pudieron predecir el rendimiento de los cultivos dentro de un año y la variabilidad de un año a otro.

[39]

- Tuvo un ciclo de repetición de 18 días con un tiempo de cruce ecuatorial de 9:45 am +/- 15 minutos.
- Datos adquiridos en el sistema de trayectoria/fila del Sistema de referencia mundial-1 (WRS-1), con superposición de franjas (o superposición lateral) que varía desde el 14 % en el ecuador hasta un máximo de aproximadamente el 85 % en los 81 grados de latitud norte o sur.
- Resolución de 80 metros-suelo

Tres cámaras operando en las siguientes bandas espectrales:

- Banda 1 Azul-verde visible (475-575 nm)
- Banda 2 Naranja-rojo visible (580-680 nm)
- Banda 3 Rojo visible a infrarrojo cercano (690-830 nm)
- Los sensores MSS eran dispositivos de exploración lineal que observaban la Tierra perpendicularmente a la trayectoria orbital.
- Banda 4 Verde visible (0,5 a 0,6  $\mu\text{m}$ )
- Banda 5 Rojo visible (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ )
- Banda 6 Infrarrojo cercano (0,7 a 0,8  $\mu\text{m}$ )
- Banda 7 Infrarrojo cercano (0,8 a 1,1  $\mu\text{m}$ )



*Ilustración 2.16 La primera imagen de luz de Landsat 2 muestra una porción de Alberta, Canadá*

*Fuente: Science For a Changing World (USGS)*

*Recuperado de: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-2>*

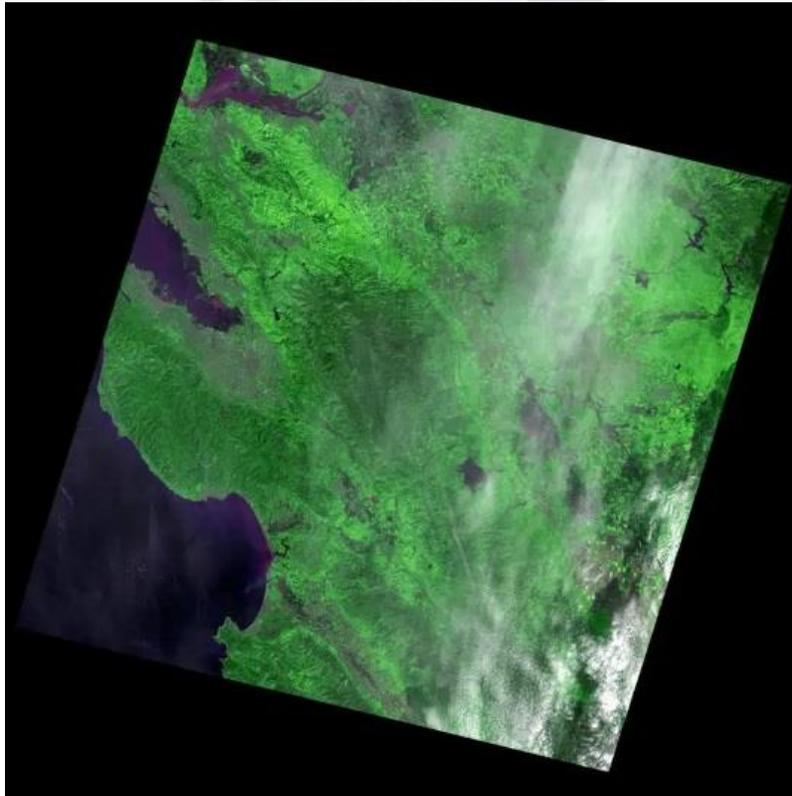
### **2.11.1.3. Landsat 3**

Desarrollado para ampliar el tiempo de observación de la Tierra, el Landsat 3 fue lanzado el 5 de marzo de 1978 y fue retirado del servicio cinco años después, el 7 de septiembre de 1983. [39]

- Tuvo un ciclo de 18 días y un tiempo de cruce ecuatorial de 9:30 am hora local promedio (+/- 15 minutos).
- Datos adquiridos en el sistema de trayectoria/fila WRS-1, con superposición de franjas (o superposición lateral) que varía desde el 14 % en el ecuador hasta un máximo de aproximadamente el 85 % en los 81 grados de latitud norte o sur.
- Con Landsat 2 y Landsat 3 en órbita, EE. UU. podría recibir una cobertura repetida de nueve días.
- Resolución terrestre de 80 metros en cuatro bandas espectrales:

- Banda 4 Verde visible (0,5 a 0,6  $\mu\text{m}$ ).
- Banda 5 Rojo visible (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ ).
- Banda 6 Infrarrojo cercano (0,7 a 0,8  $\mu\text{m}$ ).
- Banda 7 Infrarrojo cercano (0,8 a 1,1  $\mu\text{m}$ ).
- Seis detectores para cada banda espectral proporcionaron seis líneas de exploración en cada exploración activa.
- Intervalo de muestreo terrestre (tamaño de píxel): 57 x 79 m.
- Tamaño de la escena: 170 km x 185 km.

El 7 de marzo de 1978, Landsat 3 capturó su primera imagen sobre Silicon Valley, en el norte de California. [39]



*Ilustración 2.17 Imagen de la primera luz de Landsat 3 del norte de California*

*Fuente: Science For a Changing World (USGS)*

*Recuperado de: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-3>*

#### 2.11.1.4. Landsat 4

Landsat 4 fue lanzado el 16 de julio de 1982 y el satélite recogió datos hasta diciembre de 1993, pero no fue retirado del servicio hasta 2001. [39]

La resolución espacial mejorada de Landsat 4 era de 30 metros y la recogida de datos del satélite incluía una banda térmica. El nuevo sensor Thematic Mapper a bordo de Landsat 4 permitió por primera vez la representación de datos en color natural. [39]

- Alcanzó una altitud de 705 km.
- La vuelta a la Tierra cada 99 minutos
- Tuvo un ciclo repetido de 16 días con un tiempo de cruce ecuatorial de 9:45 am +/- 15 minutos.
- Adquirido en el sistema de trayectoria/fila del Sistema de referencia mundial-2 (WRS-2), con superposición de franjas (o superposición lateral) que varía desde el 7 por ciento en el ecuador hasta un máximo de aproximadamente el 85 por ciento en latitudes extremas. [39]
- El sensor MSS del Landsat 4 era idéntico al de los Landsat 1, 2 y 3.

Cuatro bandas espectrales:

- Banda 4 visible (0,5 a 0,6  $\mu\text{m}$ )
- Banda 5 visible (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ )
- Banda 6 Infrarrojo cercano (0,7 a 0,8  $\mu\text{m}$ )
- Banda 7 Infrarrojo cercano (0,8 a 1,1  $\mu\text{m}$ )
- Datos: 100 kHz digitales
- Seis detectores para cada banda reflectante proporcionaron seis líneas de exploración en cada exploración activa
- Intervalo de muestreo terrestre (tamaño de píxel): 57 x 79 m
- Ancho de barrido: 185 km (115 millas)
- Se agregó el infrarrojo de rango medio a los datos.

Siete bandas espectrales, incluida una banda térmica:

- Banda 1 Visible (0,45 - 0,52  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 2 Visible (0,52 - 0,60  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 3 Visible (0,63 - 0,69  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 4 Infrarrojo cercano (0,76 - 0,90  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 5 Infrarrojo cercano (1,55 - 1,75  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 6 Térmica (10,40 - 12,50  $\mu\text{m}$ ) 120 m.
- Banda 7 Infrarrojo medio (IR) (2,08 - 2,35  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Intervalo de muestreo terrestre (tamaño de píxel): 30 m reflectante, 120 m térmico.
- Ancho de barrido: 185 km (115 millas).

El 25 de julio de 1982, la primera imagen luminosa de Landsat 4 captó el este del lago Erie, Toledo, Detroit y Windsor. [39]



*Ilustración 2.18 Imagen de primera luz de Landsat 4 sobre el oeste del lago Erie, 25 de julio de 1982.*

*Fuente: Science For a Changing World (USGS)*

*Recuperado de: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-4>*

### **2.11.1.5. Landsat 5.**

Landsat 5 ha sido el satélite de observación de la Tierra de más larga operación, habiendo orbitado la Tierra durante casi 29 años, desde el 1 de marzo de 1984 hasta el 5 de junio de 2013. Landsat 5 sustenta el récord mundial Guinness de «Satélite de observación de la Tierra con más tiempo en funcionamiento». La vida útil original de Landsat 5 fue de tres años. [39]

- Orbitó la Tierra a 705 km (438 millas) en una órbita casi polar sincronizada con el sol (inclinación de 98,2 grados).
- Dio la vuelta a la Tierra cada 99 minutos, catorce órbitas al día.
- Tuvo un ciclo repetido de 16 días con un tiempo de cruce ecuatorial de 9:45 am (+/- 15 minutos).
- Adquirido en el sistema de trayectoria/fila del Sistema de referencia mundial-2 (WRS-2), con superposición de franjas (o superposición lateral) que varía desde el 7 por ciento en el ecuador hasta un máximo de aproximadamente el 85 por ciento en latitudes extremas. [39]

#### **Escáner multiespectral (MSS)**

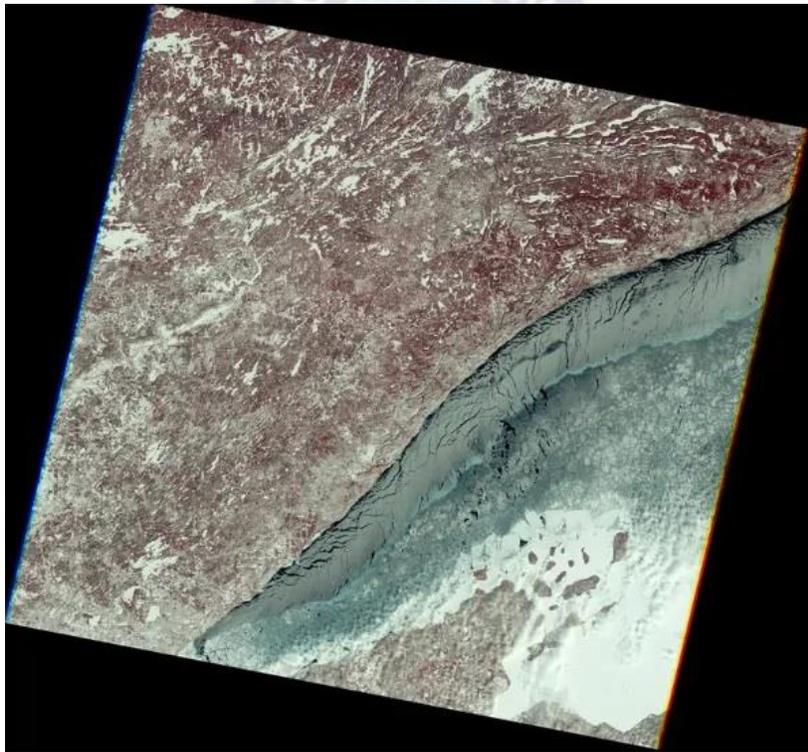
Cuatro bandas espectrales (idénticas a Landsat 1 y 2):

- Banda 4 Verde visible (0,5 a 0,6  $\mu\text{m}$ ): apagado debido a una corriente alta en agosto de 1995.
- Banda 5 Rojo visible (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ ).
- Banda 6 Infrarrojo cercano (0,7 a 0,8  $\mu\text{m}$ ).
- Banda 7 Infrarrojo cercano (0,8 a 1,1  $\mu\text{m}$ ).
- Seis detectores para cada banda espectral proporcionaron seis líneas de exploración en cada exploración activa.
- Intervalo de muestreo terrestre (tamaño de píxel): 57 x 79 m.

#### **Mapeador temático (TM).**

Se agregó el infrarrojo de rango medio a los datos y también las siete bandas espectrales, incluida una banda térmica:

- Banda 1 Visible (0,45 - 0,52  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 2 Visible (0,52 - 0,60  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 3 Visible (0,63 - 0,69  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 4 Infrarrojo cercano (0,76 - 0,90  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 5 Infrarrojo cercano (1,55 - 1,75  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 6 Térmica (10,40 - 12,50  $\mu\text{m}$ ) 120 m.
- Banda 7 Infrarrojo medio (2,08 - 2,35  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Intervalo de muestreo terrestre (tamaño de píxel): 30 m reflectante, 120 m térmico.



*Ilustración 2.19 Imagen satelital compuesta en falso color utilizando las bandas del infrarrojo cercano, rojo y verde para el Lago Superior, el norte de Minnesota y las Islas Apóstoles de Wisconsin.*

*Fuente: Science For a Changing World (USGS)*

*Recuperado de: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5>*

#### **2.11.1.6. Landsat 6.**

Landsat 6 se lanzó el 5 de octubre de 1993 en un cohete Titan II desde la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg, California, pero no alcanzó la órbita. El satélite llevaba el Mapeador

temático mejorado, una versión mejorada de los instrumentos de Landsat 4 y Landsat 5, e incluía una banda pancromática de 15 metros. [39]

#### **2.11.1.7. Landsat 7.**

Landsat 7 fue lanzado desde la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg en California el 15 de abril de 1999 en un cohete Delta II. El satélite lleva el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). Este instrumento se mejoró con respecto a los diseños de instrumentación anteriores. Las características principales de Landsat 7 incluyen una banda pancromática con una resolución espacial de 15 metros, un calibrador solar de apertura completa integrado, una calibración radiométrica absoluta del cinco por ciento y un canal infrarrojo térmico con una mejora de cuatro veces en la resolución espacial sobre Thematic Mapper (TM). Desde junio de 2003, el sensor ha adquirido y entregado datos con brechas de datos causadas por la falla del corrector de línea de exploración (SLC). [39]

En octubre de 2008, USGS hizo que todos los datos de Landsat 7 fueran gratuitos para el público mundial; las descargas de datos aumentaron sesenta veces. Aproximadamente cuatro meses después, todos los datos de Landsat estuvieron disponibles sin costo alguno. [39]

#### **Datos de la órbita del satélite Landsat 7**

- Gira alrededor de la Tierra a 705 km en una órbita casi polar sincronizada con el sol (inclinación de 98,2 grados).
- Da la vuelta a la Tierra cada 99 minutos.
- Tiene un ciclo de repetición de 16 días con un tiempo de cruce ecuatorial: 10:00 am (+/- 15 minutos).
- Adquirido en el sistema de trayectoria/fila del Sistema de referencia mundial-2 (WRS-2), con superposición de franjas (o superposición lateral) que varía desde el 7 % en el ecuador hasta un máximo de aproximadamente el 85 % en latitudes extremas. [39]

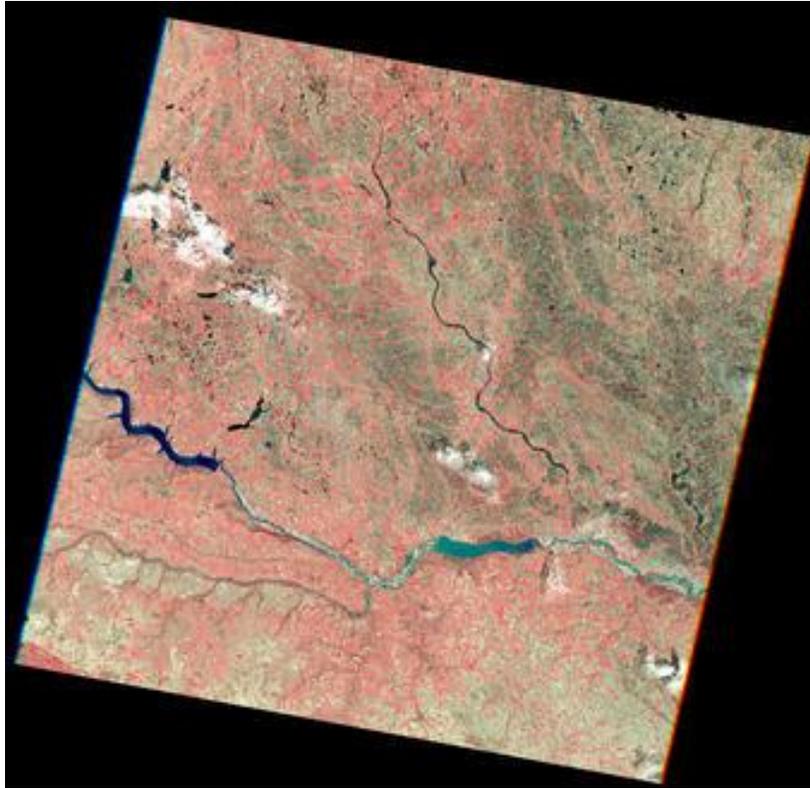
#### **Datos de la nave espacial Landsat 7**

- Peso aproximado. 4800 libras (2200 kg).

- Longitud: 4,3 m (14 pies).
- Diámetro: 2,8 m (9 pies).
- Enlace descendente directo con registradores de estado sólido (SSR).
- Velocidad de datos: 150 Mbps.
- Landsat 7 lleva el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), una versión mejorada de los instrumentos Thematic Mapper que estaban a bordo de Landsat 4 y Landsat 5. Los productos Landsat 7 se entregan como imágenes de 8 bits con 256 niveles de gris. [39]

El ETM+ contiene ocho bandas espectrales, incluida una panoramización y una banda térmica:

- Banda 1 Azul (0,45 - 0,52  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 2 Verde (0,52 - 0,60  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 3 Roja (0,63 - 0,69  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 4 Infrarrojo cercano (0,77 - 0,90  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 5 Infrarrojos de onda corta (1,55 - 1,75  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 6 Térmica (10,40 - 12,50  $\mu\text{m}$ ) 60 m Baja Ganancia / Alta Ganancia.
- Banda 7 Infrarrojo medio (2,08 - 2,35  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 8 Pancromática (PAN) (0,52 - 0,90  $\mu\text{m}$ ) 15 m.
- Intervalo de muestreo terrestre (tamaño de píxel): 30 m reflectante, 60 m térmico.
- Se agregaron las bandas térmicas de 60 m de ganancia baja y alta Banda 6.
- Se agregó calibración a bordo a Landsat 7: un calibrador solar de apertura completa (FASC) y un calibrador solar de apertura parcial (PASC), además de las 2 lámparas de calibración. [39]



*Ilustración 2.20 Imagen infrarroja en color del sureste de Dakota del Sur se anunció como la primera imagen adquirida por el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+).*

*Fuente: Science For a Changing World (USGS)*

*Recuperado de: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7>*

#### **2.11.1.8. Landsat 8**

Landsat 8 (anteriormente Landsat Data Continuity Mission, o LDCM) se lanzó en un cohete Atlas-V desde la Base de la Fuerza Aérea de Vandenberg, California, el 11 de febrero de 2013. El satélite transporta Operational Land Imager (OLI) y el sensor infrarrojo térmico (TIRS) instrumentos. [39]

El OLI mide en las porciones visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (VNIR, NIR y SWIR) del espectro. El TIRS mide la temperatura de la superficie terrestre en dos bandas térmicas con una nueva tecnología que aplica la física cuántica para detectar el calor. Las imágenes de Landsat 8 tienen resoluciones espaciales pancromáticas de 15 metros y multiespectrales de 30 metros a lo largo de una franja de 185 km (115 millas). [39]

### **Datos de la órbita del satélite Landsat 8.**

- Gira alrededor de la Tierra en una órbita casi polar sincronizada con el sol (inclinación de 98,2 grados).
- Alcanzó una altitud de 705 km.
- Completa una órbita terrestre cada 99 minutos.
- Tiene un ciclo de repetición de 16 días con un tiempo de cruce ecuatorial de 10:00 am +/- 15 minutos.
- Adquiere alrededor de 740 escenas por día en el sistema de ruta/fila del Sistema de referencia mundial-2 (WRS-2), con una superposición de franjas (o superposición lateral) que varía desde el 7 % en el ecuador hasta un máximo de aproximadamente el 85 % en latitudes extremas. [39]

### **Generador de imágenes terrestres operacionales (OLI).**

Nueve bandas espectrales, incluida una banda panorámica:

- Aerosol Costero Banda 1 (0,43 - 0,45  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 2 Azul (0,450 - 0,51  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 3 Verde (0,53 - 0,59  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 4 Roja (0,64 - 0,67  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 5 Infrarrojo cercano (0,85 - 0,88  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 6 SWIR 1 (1,57 - 1,65  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 7 SWIR 2 (2,11 - 2,29  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 8 Pancromática (PAN) (0,50 - 0,68  $\mu\text{m}$ ) 15 m.
- Banda 9 Cirro (1,36 - 1,38  $\mu\text{m}$ ) 30 m.

OLI captura datos con precisión radiométrica mejorada en un rango dinámico de 12 bits, lo que mejora la relación señal/ruido general. Esto se traduce en 4096 niveles de gris potenciales, en comparación con solo 256 niveles de gris en los instrumentos Landsat 1-7 de 8 bits. El rendimiento mejorado de señal a ruido permite una mejor caracterización del estado y la condición de la cubierta terrestre. [39]

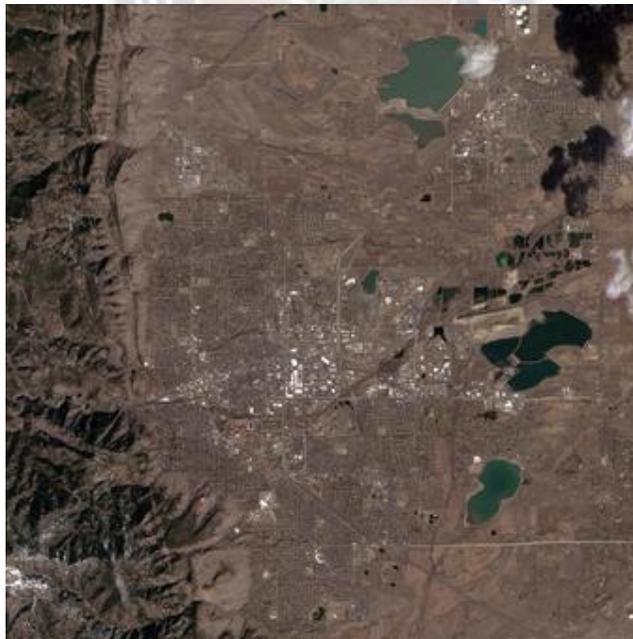
Los datos de 12 bits se escalan a enteros de 16 bits y se entregan en los productos de datos de nivel 1. Los productos se escalan a 55 000 niveles de gris y se pueden reescalar a la reflectancia y/o radiancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) utilizando los coeficientes de reescalado radiométrico proporcionados en el archivo de metadatos del producto (archivo MTL). [39]

### **Sensor infrarrojo térmico (TIRS).**

Dos bandas espectrales:

- Banda 10 TIRS 1 (10,6 - 11,19  $\mu\text{m}$ ) 100 m.
- Banda 11 TIRS 2 (11,5 - 12,51  $\mu\text{m}$ ) 100 m.

OLI/TIRS adquirió casi 10.000 escenas después del lanzamiento (11 de febrero de 2013) hasta el 10 de abril de 2013, cuando el satélite alcanzó la órbita operativa (WRS-2). Las primeras imágenes son solo datos TIRS. Estos datos también son visibles y se pueden descargar desde EarthExplorer o GloVis. [39]



*Ilustración 2.21 La primera imagen de Landsat 8 capturó el área donde se encuentran las Grandes Llanuras y las Montañas Rocosas en Colorado.*

*Fuente: Science For a Changing World (USGS)*

*Recuperado de: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>*

### **2.11.1.9. Landsat 9.**

Lanzado el 27 de septiembre de 2021 a la 1:12 p. m. desde la Base de la Fuerza Aérea de Vandenberg, California, a bordo de un cohete United Launch Alliance Atlas V 401. Landsat 9 lleva el Operational Land Imager 2 (OLI-2), construido por Ball Aerospace & Technologies Corporation, Boulder, Colorado, y el Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2), construido en el Goddard Space Flight Center de la NASA, Greenbelt, Maryland. [39]

Después de que la NASA completa el control en órbita, el USGS es responsable del sistema terrestre, las operaciones de vuelo, el procesamiento de datos, la distribución y el archivo de productos de datos. [39]

El satélite lleva dos instrumentos científicos, el Operational Land Imager 2 (OLI-2) y el Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2). El OLI-2 captura observaciones de la superficie de la Tierra en bandas visibles, del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta, y el TIRS-2 mide la radiación infrarroja térmica, o calor, emitida desde la superficie de la Tierra. Tanto OLI como TIRS tienen una vida útil de diseño de misión de 5 años, aunque la nave espacial tiene más de 10 años de consumibles. [39]

Las mejoras de Landsat 9 incluyen una resolución radiométrica más alta para OLI-2 (cuantificación de 14 bits aumentada de 12 bits para Landsat 8) que permite a los sensores detectar diferencias más sutiles, especialmente en áreas más oscuras como agua o bosques densos. Con la resolución radiométrica más alta, Landsat 9 puede diferenciar 16 384 tonos de una determinada longitud de onda. En comparación, Landsat 8 proporciona datos de 12 bits y 4096 cortinas. Además de la mejora OLI-2, TIRS-2 ha reducido significativamente la luz parásita en comparación con el Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS) Landsat 8, que permite una corrección atmosférica mejorada y mediciones de temperatura superficial más precisas. [39]

#### **Operacional Land Imager 2 (OLI-2).**

OLI-2 proporcionará datos para nueve bandas espectrales con una distancia máxima de muestreo en tierra, tanto en la pista como transversal, de 30 metros para todas las bandas excepto la banda pancromática, que tiene una GSD de 15 metros. [39]

Nueve bandas espectrales:

- Banda 1 visible (0,43 - 0,45  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 2 visible (0,450 - 0,51  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 3 visible (0,53 - 0,59  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 4 Roja (0,64 - 0,67  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 5 Infrarrojo cercano (0,85 - 0,88  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 6 SWIR 1 (1,57 - 1,65  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 7 SWIR 2 (2,11 - 2,29  $\mu\text{m}$ ) 30 m.
- Banda 8 Pancromática (PAN) (0,50 - 0,68  $\mu\text{m}$ ) 15 m.
- Banda 9 Cirro (1,36 - 1,38  $\mu\text{m}$ ) 30 m.

#### **Sensor infrarrojo térmico 2 (TIRS-2).**

El sensor infrarrojo térmico 2 (TIRS-2) de Landsat 9 mide la radiación térmica emitida desde la superficie terrestre en dos bandas de infrarrojo térmico usando la misma tecnología que se usó para TIRS en Landsat 8, sin embargo, TIRS-2 es una versión mejorada de TIRS de Landsat 8, tanto en lo que respecta a la clase de riesgo del instrumento como al diseño para minimizar la luz parásita. TIRS-2 proporciona dos bandas espectrales con una distancia máxima de muestreo en tierra. [39]

- Banda 10 TIRS 1 (10,6 - 11,19  $\mu\text{m}$ ) 100 m.
- Banda 11 TIRS 2 (11,5 - 12,51  $\mu\text{m}$ ) 100 m.

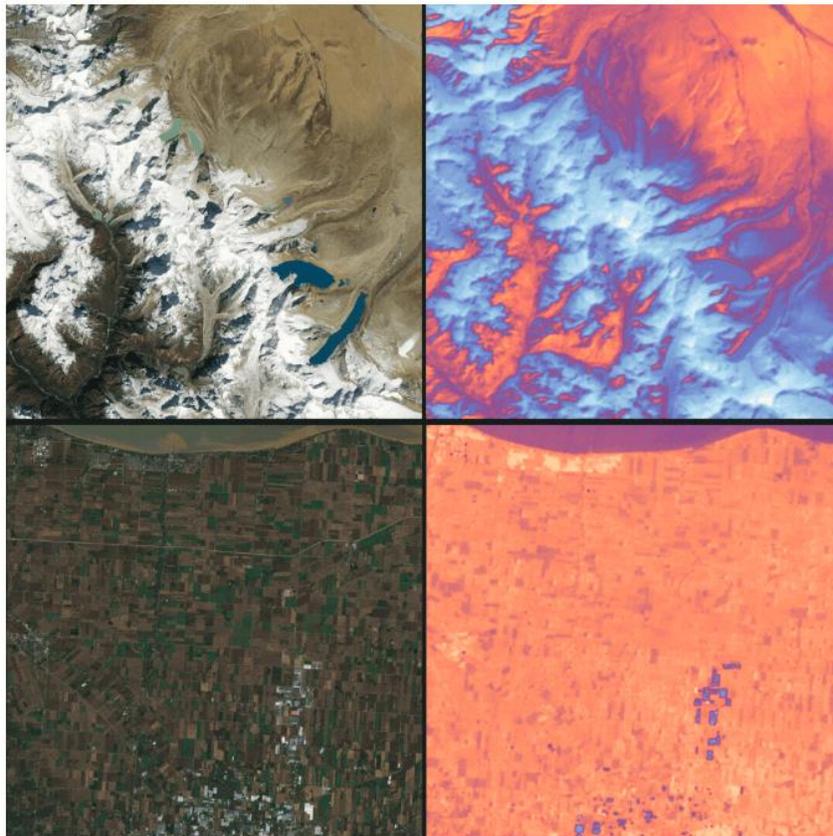
#### **Productos de datos Landsat 9.**

Los datos adquiridos por Landsat 9 se procesan en la estructura de inventario Landsat Collection 2 en el sistema de ruta/fila del Sistema de referencia mundial-2 (WRS-2), con superposición de franjas (o superposición lateral) que varía del 7 por ciento en el ecuador a un máximo de aproximadamente 85 por ciento en latitudes extremas. [39]

Landsat 9 recopila hasta 750 escenas por día, y con Landsat 8, los dos satélites agregan casi 1500 nuevas escenas por día al archivo USGS Landsat. Landsat 9

aumenta el volumen del archivo del USGS al generar imágenes de todas las masas terrestres globales y las regiones costeras cercanas a la costa, incluidas las islas con ángulos de elevación solar superiores a 5 grados que no siempre se recopilaban de forma rutinaria antes de Landsat 8. [39]

Todos los datos y productos de Landsat 9 están disponibles para su descarga a través del Centro de Ciencia y Observación de Recursos Terrestres (EROS) de USGS sin cargo. [39]



*Ilustración 2.22 Primeras imágenes adquiridas por el Satélite Landsat 9*  
*Fuente: Science For a Changing World (USGS)*  
*Recuperado de: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>*

## CAPÍTULO 3

### 3. INGENIERÍA DEL PROYECTO.

Para el presente proyecto se realizó un análisis de las áreas afectadas por incendios suscitados en el Municipio de San Ignacio de Velasco lo cual nos demuestra un notable aumento en el número de incendios forestales y severidad producida en los mismos durante las últimas gestiones, también se obtuvieron datos de los diferentes factores de temperatura, humedad y presión con los cuales fue posible realizar un análisis temporal estacionario de datos.

Todo el análisis se realizó a través del procesamiento de imágenes satelitales, provenientes del sensor OLI perteneciente a las misiones Landsat, administradas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Las imágenes fueron procesadas espectralmente a través del software RStudio, mediante el cual se obtuvo diferentes cartografías del Municipio de San Ignacio de Velasco que muestra el grado de la severidad por quemadura generada por los incendios en estas áreas para la gestión 2022.

#### 3.1. Estadística de incendios en el Municipio de San Ignacio de Velasco.

Los Chaqueos son una práctica común de deforestación la cual que se ha estado incrementando en nuestro país en los últimos años. Estudios recientes muestran como los incendios son responsables de diferentes efectos sobre los cambios en la humedad, la estructura y la infiltración del suelo. [40], [41], [42].

Tras la revisión de los diferentes sucesos de incendios en el municipio de San Ignacio de Velasco se pudo recabar los siguientes datos de pérdida de cobertura vegetal a causa de los incendios forestales, los datos fueron recabados de Global Forest Watch (GFW), que es una plataforma en línea que proporciona datos y herramientas para el monitoreo de bosques. [43]

De 2001 a 2022, San Ignacio de Velasco perdió 236 kha de cobertura arbórea a causa de los incendios y 707 kha a causa de otros factores de pérdida. Durante ese período, el año con mayor pérdida de cobertura arbórea a causa de los incendios fue 2020 con 57.7 kha desaparecidas, 52% de la pérdida total de cobertura arbórea para ese año. [43]

Se han registrado 1,172 alertas de incendio notificadas (obtenidas a través del satélite MODIS) hasta el momento en 2023, tomando en cuenta únicamente las alertas de alta

confianza. Este total es normal en comparación con el total de años anteriores desde 2001. El año con más incendios registrados fue 2021, con 3,576. [43]

Gestion	Superficie afectada (ha)	Gestion	Superficie afectada (ha)
2001	634	2012	6340
2002	1510	2013	1960
2003	794	2014	884
2004	6370	2015	3150
2005	1990	2016	10700
2006	2510	2017	24300
2007	2650	2018	2910
2008	3470	2019	31500
2009	1080	2020	57700
2010	7950	2021	30800
2011	3000	2022	33600

Tabla 3.1 Datos de incendios para el municipio de San Ignacio de Velasco.  
Fuente. <https://www.globalforestwatch.org/>  
Elaboración propia.

Como se puede observar en los datos existen gran cantidad de perdida de cobertura en la gestión 2019 y 2020, ya que los años mencionados son catalogados las gestiones con mayor número de incendios y mayor perdida que superficie a causa de los mismos.

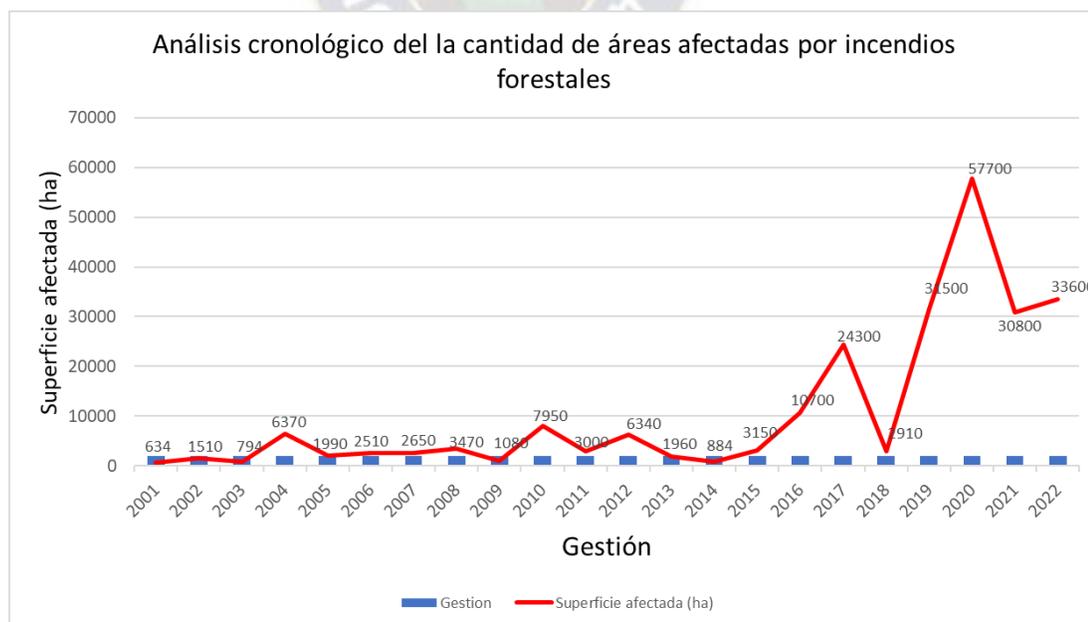


Ilustración 3.1 Áreas afectadas por incendios forestales.  
Fuente datos: <https://www.globalforestwatch.org/>  
Elaboración propia.

Así también, en la anterior ilustración se ve notablemente que a partir de la gestión 2015 se generó un aumento para el número de áreas afectadas por incendios forestales lo cual puede causar diferentes efectos en los suelos y procesos del ecosistema. [41]

Según el Ministerio de Medio Ambiente y Agua para agosto de la gestión 2023 menciona lo siguiente:

“En comparación con el año pasado, hasta agosto teníamos más de 100 mil hectáreas quemadas a nivel Nacional, este año tenemos 11 mil hectáreas quemadas. Sabemos que esto es un buen indicador porque es resultado de las estrategias implementadas” [44]

### **3.1.1. Análisis de regresión temporal - estacional.**

Los análisis temporales estacionales, también conocidos como estudios estacionales, son investigaciones que se centran en comprender y analizar patrones, cambios y fenómenos que ocurren de manera cíclica a lo largo de las estaciones del año. En el ámbito ambiental debido a los cambios de estacionalidad que se tiene en los ciclos de la tierra, es necesario realizar este tipo de estudio ya que permite ver de forma más precisa el comportamiento de las variaciones climáticas a lo largo del año, esto incluye la identificación de patrones de temperatura, precipitación y otros fenómenos meteorológicos estacionales.

Diferentes estudios realizados en Siberia e India han demostrado una afectación significativa de los parámetros humedad presión temperatura, a causa de los incendios forestales siendo en muchos casos un factor primario en la variación de los mismos. [41], [45], [46]. Este hecho también se comprueba con lo sucedido en el Municipio de San Ignacio de Velasco, el cual ha estado sufriendo bastantes incendios en los últimos años.

A continuación, con diferentes datos de temperatura, presión y humedad para el Municipio de San Ignacio de Velasco se pudo obtener y realizar una regresión temporal estacional con el fin de evaluar la tendencia de los datos a lo largo de los años

Para la aplicación del análisis de regresión temporal de los datos se siguieron los siguientes pasos:

- Se asignó un periodo a cada muestra, para nuestro caso el periodo es considerado de 365 días para cada año, es decir que nuestros datos se representaran en 11 años de estudio y cada año estará cubierto por 365 muestras.

- Mediante el uso de la herramienta **Análisis de datos** la cual se encuentra en Excel, se obtuvo una regresión lineal con la cual es posible determinar el comportamiento de los datos estudiados para futuros años, sin embargo, es necesario buscar un índice de estacionalidad ya que nuestros datos analizados son estacionarios.
- Para el cálculo del índice de estacionalidad se lo realizó por el método del promedio móvil, el cual consiste en calcular el promedio para cada muestra a lo largo del año, es decir; para el día 1 de los 11 años se obtiene un promedio, lo mismo para el día 2,3,4, etc. El promedio anterior tendrá que ser dividido entre el promedio total de las muestras y el resultado será el índice de estacionalidad.
- Una vez obtenidos la regresión y el índice de estacionalidad los podemos asociar mediante el producto de los mismos, con lo cual se obtendrá un pronóstico con estacionalidad para los diferentes datos.
- Finalmente se aplicó el cálculo de la desviación absoluta media para determinar el error de nuestro pronóstico así mismo se obtuvo el error porcentual del pronóstico.
- La Desviación Absoluta Media (DAM o MAE, por sus siglas en inglés) es una medida útil en el contexto de un análisis de regresión temporal. La MAE se utiliza comúnmente para evaluar la precisión de modelos de regresión y pronóstico, incluyendo aquellos que involucran datos temporales.

$$DAM = \frac{\sum_{t=1}^n |Y_{real} - Y_{pronosticado}|}{n}$$

Donde:

$Y_{real}$  : Es el valor de la muestra real.

$Y_{pronosticado}$ : Es el valor calculado por la regresión y el índice de estacionalidad.

$n$  : Es el número de muestras.

- También se realizó el cálculo del porcentaje de error medio absoluto (PEMA), ya que es una métrica comúnmente utilizada en el análisis de series temporales para evaluar la precisión de los modelos de pronóstico.

$$PEMA = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{Y_{real} - Y_{pronosticado}}{Y_{real}} \right| * 100}{n}$$

$Y_{real}$  : Es el valor de la muestra real.

$Y_{pronosticado}$ : Es el valor calculado por la regresión y el índice de estacionalidad.

$n$  : Es el número de muestras.

### 3.1.1.1. Análisis de datos temporales estacionarios para la temperatura.

Para el análisis temporal estacional para la temperatura los datos fueron obtenidos de la página Weather and Climate, en esta página podemos acceder a diferentes datos de temperatura, humedad, presión y otras métricas medioambientales los cuales están disponibles para varios países y sus diferentes ciudades. Los datos pueden ser apreciados en los anexos (6.1).

Tras el análisis de regresión las ecuaciones obtenidas son:

$$Temp_{pron} = 24.91 + 0.006717 * Dia \dots (1)$$

De la cual se puede obtener un pronóstico con estacionalidad mediante:

$$Pronostico_{Est} = Temp_{pron} * Indice \dots (2)$$

Donde:

$Temp_{pron}$  → Es el pronóstico con tendencia de la temperatura según la anterior tabla.

Dia → Es el número de día a lo largo del año.

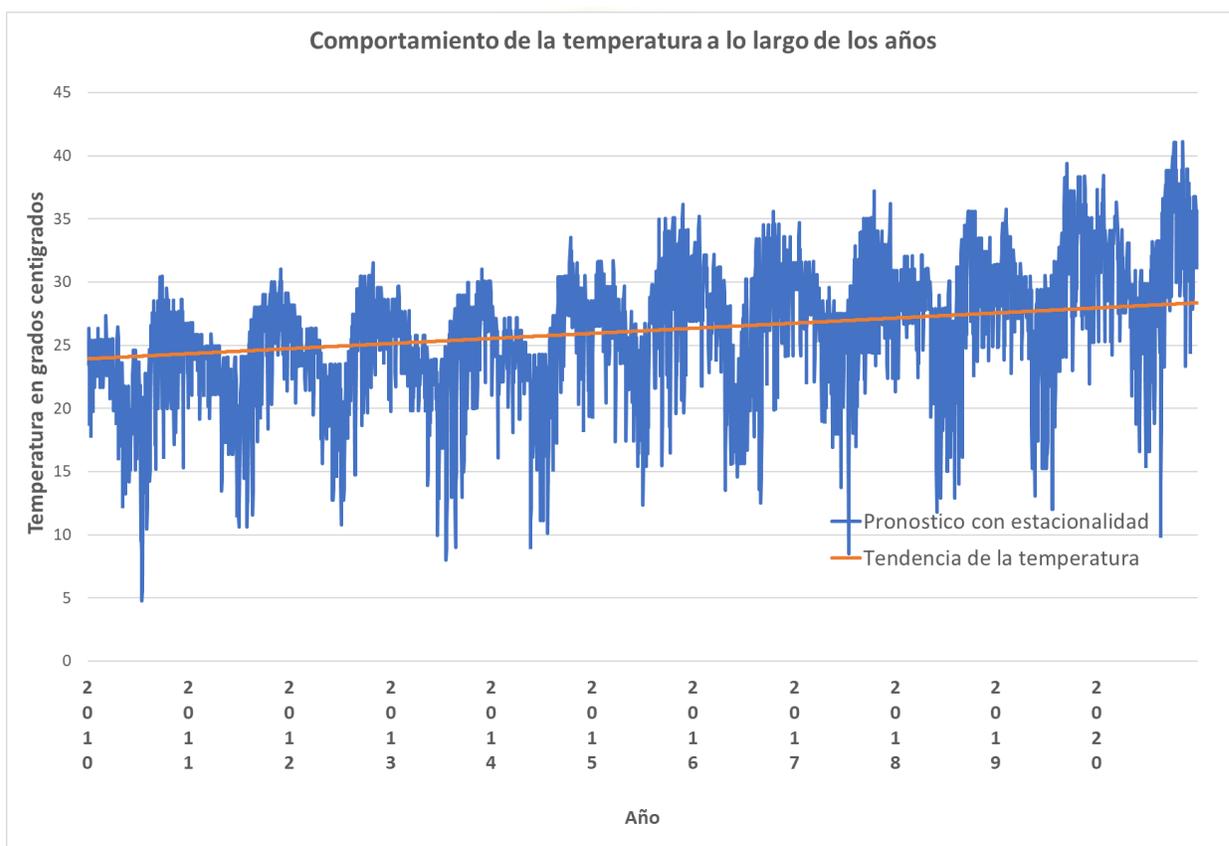
$Pronostico_{Est}$  → Es el pronóstico con estacionalidad para la regresión temporal.

Índice → Es el índice de estacionalidad según la anterior tabla.

La ecuación 1 nos describe la tendencia que ha tenido la temperatura a lo largo de los años, al obtener una pendiente positiva nos muestra un aumento continuo en la temperatura. Si bien estos efectos pueden atribuirse a diferentes fenómenos como el calentamiento global, parte de los mismos se deben en gran medida al aumento de incendios que se suscitaron en esta área en los últimos años.

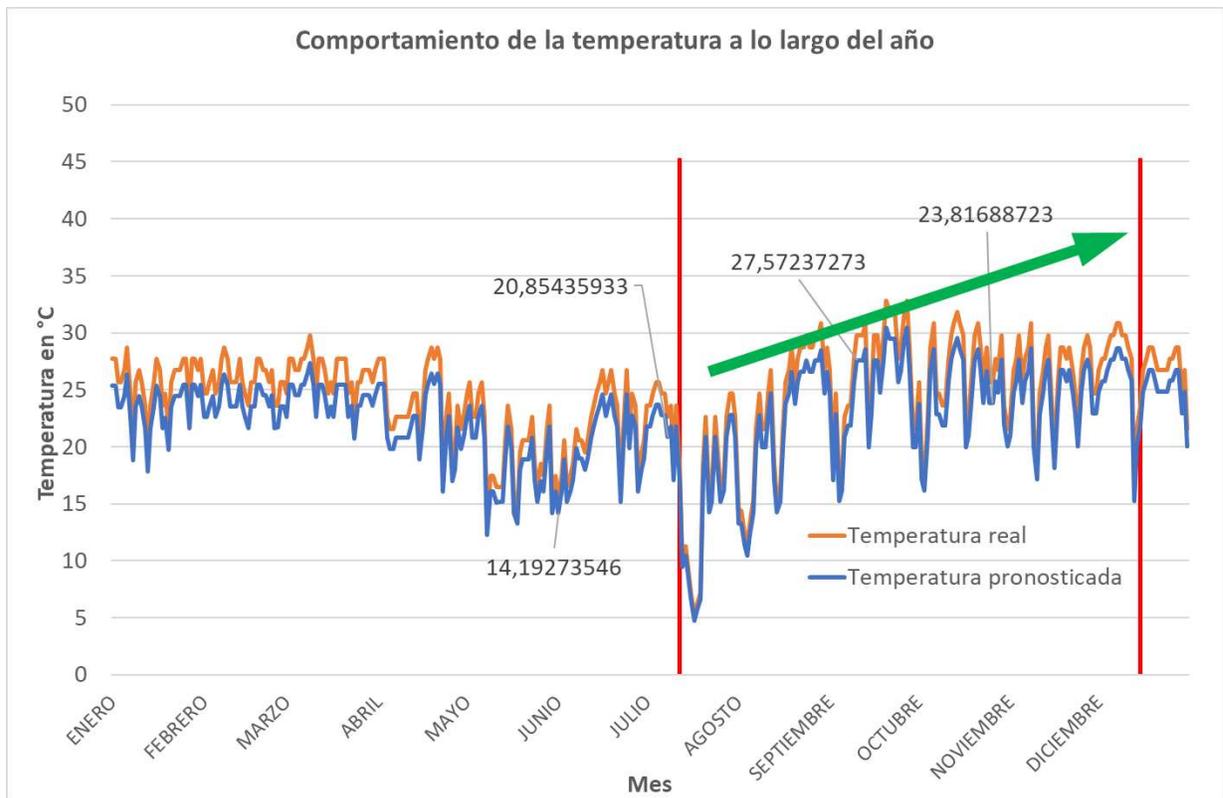
Por otro lado, la ecuación 2 nos representa el crecimiento estacional que tiene la temperatura al largo del año, en la ilustración (3.2) claramente se puede ver la repetición de un ciclo marcado por año. Las subidas y bajadas de temperatura están asociadas a las diferentes estaciones del año donde claramente se observan temperaturas bajas en invierno y temperaturas altas en verano.

La siguiente imagen describe la tendencia y comportamiento estacional de la temperatura en el Municipio de San Ignacio de Velasco.



*Ilustración 3.2 Análisis temporal de la temperatura gestiones 2010 al 2020*  
*Fuente datos: <https://tcktcktck.org/bolivia/santa-cruz/san-ignacio-de-velasco>*  
*Elaboración propia.*

Por todo lo anterior expuesto es necesario mencionar que los incendios forestales no solamente tienen incidencia sobre la severidad en el suelo, ya que los mismos también producen una alteración a la temperatura debido a que existe demasiada pérdida de cobertura vegetal lo cual reduce la capacidad de captura del carbono, generando un incremento para la absorción del calor terrestre y aumento de la temperatura.



*Ilustración 3.3 Análisis temporal de la temperatura a lo largo del año.  
Fuente datos: <https://tcktck.org/bolivia/santa-cruz/san-ignacio-de-velasco>  
Elaboración propia.*

### 3.1.1.2. Análisis de regresión temporal para datos de humedad.

Para el análisis temporal estacional para la humedad los datos fueron obtenidos de la página Weather and Climate, en esta página podemos acceder a diferentes datos de temperatura, humedad, presión y otras métricas medioambientales los cuales están disponibles para varios países y sus diferentes ciudades. Los datos pueden ser apreciados en los anexos (6.2).

De los datos presentados se realizó el análisis de regresión temporal estacional a lo largo de los años para la humedad, donde se obtuvo la regresión representada por las ecuaciones:

$$H_{pron} = 78,87 - 0,059 * Dia \dots (1)$$

De la cual se puede obtener un pronóstico con estacionalidad mediante:

$$Pron_{hum_{ten}} = H_{pron} * Indice \dots (2)$$

Donde:

$H_{pron}$  → Es la tendencia de la humedad a lo largo de los años.

Día → Es el número de día a lo largo del año.

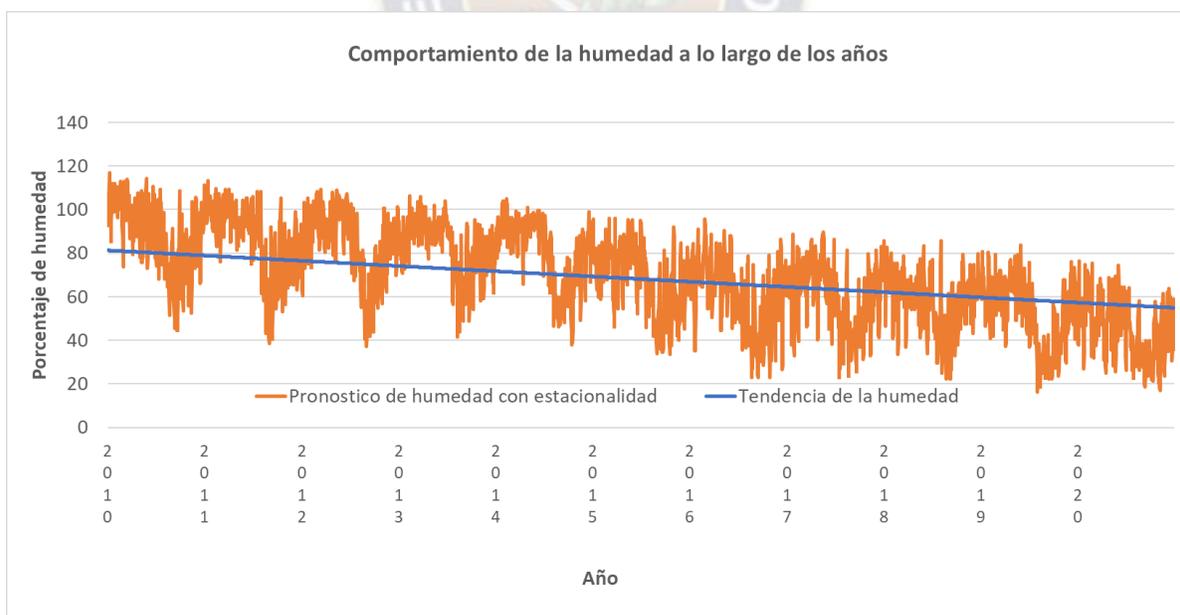
*Pron\_hum\_ten* → Es el pronóstico de humedad con estacionalidad para el análisis temporal.

Índice → Es el índice de estacionalidad.

La ecuación 1 nos describe la tendencia que ha tenido la humedad a lo largo de los años, al obtener una pendiente negativa nos muestra una reducción continua en la humedad. Si bien estos efectos pueden atribuirse a diferentes fenómenos como el calentamiento global, parte de los mismos se deben en gran medida al aumento de incendios que se suscitaron en esta área, ya que el aumento de la temperatura genera una sequedad en el ambiente.

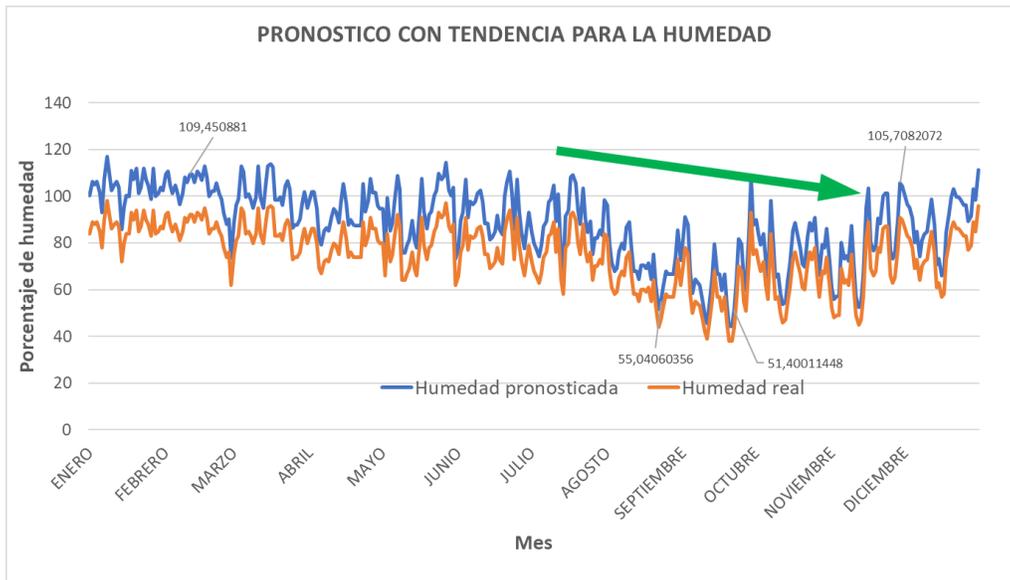
Por otro lado, la ecuación 2 nos representa el comportamiento de la humedad en las diferentes estaciones a lo largo del año, misma que genera una tendencia decreciente para las estaciones donde existen mayor ocurrencia de incendios, en la ilustración (3.5) claramente se puede ver la repetición de un ciclo marcado por año.

La siguiente imagen describe la tendencia y comportamiento estacional de la humedad en el Municipio de San Ignacio de Velasco.



*Ilustración 3.4 Análisis temporal de la humedad gestiones 2010 al 2020*  
*Fuente datos: <https://tcktcktck.org/bolivia/santa-cruz/san-ignacio-de-velasco>*  
*Elaboración propia.*

De la anterior imagen se puede mencionar que los bajos niveles de humedad no son adecuados para los diferentes tipos de vegetación ya que los bajos registros de humedad podrían generar una sequedad en la vegetación por lo cual estarían más expuestos a futuros incendios.



*Ilustración 3.5 Análisis temporal de la temperatura a lo largo del año.  
Fuente datos: <https://tcktcktck.org/bolivia/santa-cruz/san-ignacio-de-velasco>  
Elaboración propia.*

### 3.1.1.3. Análisis de regresión temporal estacional para datos de presión.

Para el análisis temporal estacional para la presión los datos fueron obtenidos de la página Weather and Climate, en esta página podemos acceder a diferentes datos de temperatura, humedad, presión y otras métricas medioambientales los cuales están disponibles para varios países y sus diferentes ciudades. Los datos pueden ser apreciados en los anexos (6.3).

Tras realizar el análisis para datos de presión para el municipio de San Ignacio de Velasco en la cual se obtuvo una regresión temporal con el fin de evaluar la tendencia de la presión atmosférica a lo largo de los años, se pudo observar que para el registro de valores altos de temperatura se obtienen valores mínimos de presión lo cual nos indica ambas variables se relacionan de manera inversa.

De los datos anteriormente presentados se realizó el análisis de regresión temporal para la presión a lo largo de los años, donde se obtuvo la regresión representada por las ecuaciones:

$$Pres_{pron} = 779,623 - 0,0025 * Dia \dots (1)$$

De la cual se puede obtener un pronóstico con estacionalidad mediante:

$$Pron_{pres_{ten}} = Pres_{pron} * Indice \dots (1)$$

Donde:

Pres\_pron → Es el pronóstico para la presión según la anterior tabla.

Dia → Es el número de día a lo largo del año.

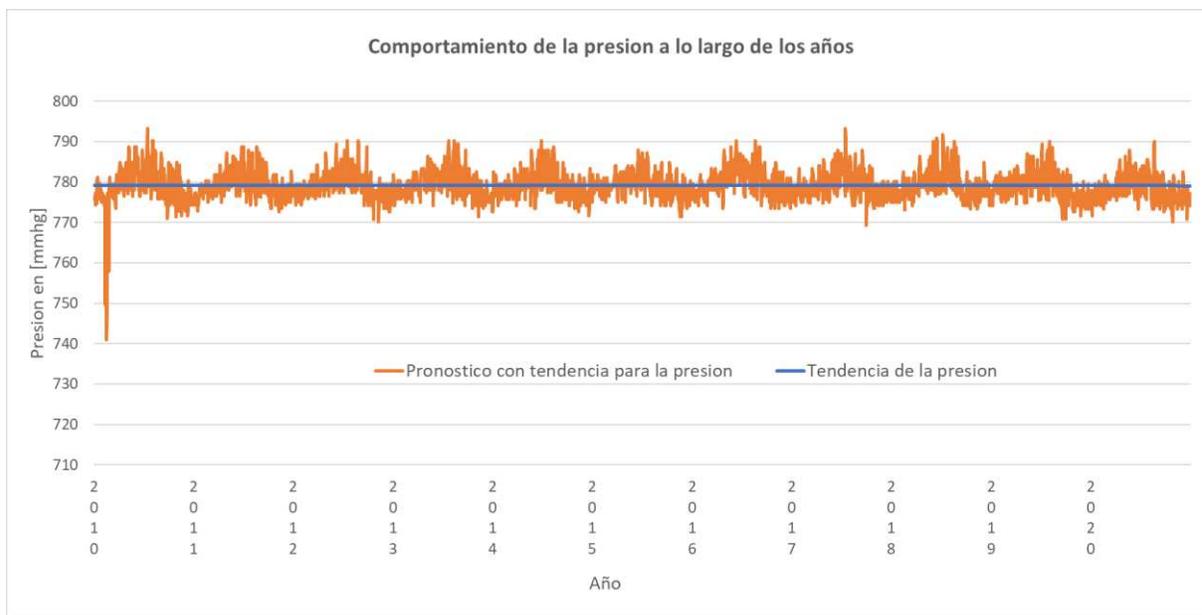
Pron\_pres\_ten → Es el pronóstico con tendencia de la presión.

Índice → Es el índice de estacionalidad según la anterior tabla.

La ecuación 1 nos describe la tendencia que ha tenido la presión a lo largo de los años, al obtener una pendiente negativa nos muestra una reducción continua en la presión. Este comportamiento de la presión está totalmente relacionado con los cambios de temperatura ya que un aumento de temperatura corresponde una dilatación del aire y, por tanto, una disminución de presión entre las moléculas del aire.

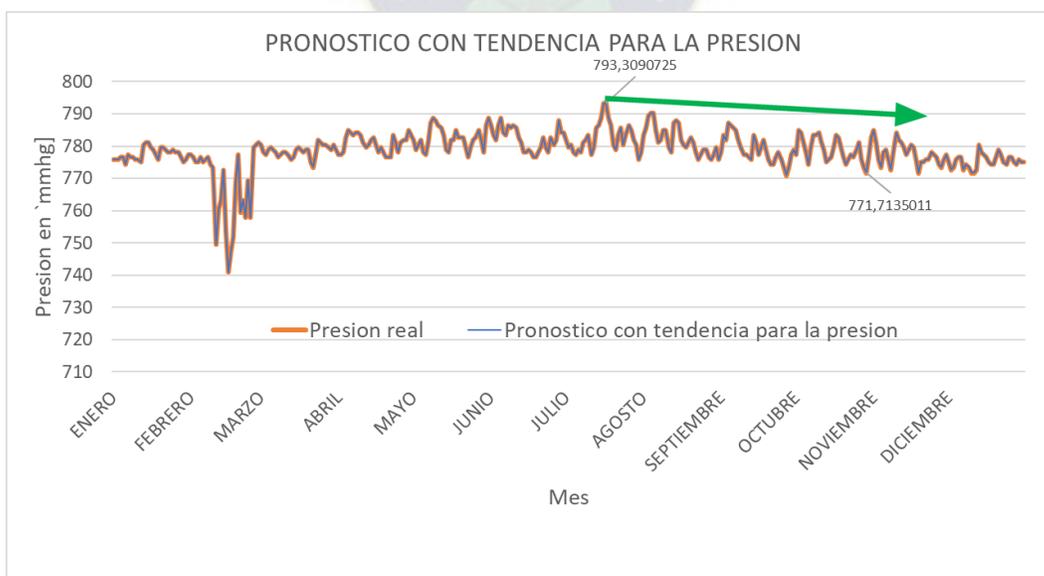
Por otro lado, la ecuación 2 nos representa el comportamiento de la presión en las diferentes estaciones a lo largo del año, mismo que presenta un comportamiento cuasi normal y poco variable, en la ilustración (3.7) claramente se puede observar lo mencionado.

En la siguiente imagen se puede observar la tendencia y comportamiento estacional de la presión para cada año, donde apreciamos una tendencia decreciente, misma que es repetitiva en todas las gestiones. Por otra parte, se observa que las estaciones del año con menor registro de presión se dan en los meses de julio a diciembre, mismas que coinciden con las épocas de generación de incendios forestales.



*Ilustración 3.6 Análisis temporal de la presión gestiones 2010 al 2020*  
 Fuente datos: <https://tcktcktck.org/bolivia/santa-cruz/san-ignacio-de-velasco>  
 Elaboración propia.

Así mismo se obtuvo el comportamiento de la presión a lo largo del año, en el cual se puede verificar que los meses con menor registro para el valor de la presión en el área de estudio coinciden con los meses de mayor sucesión de incendios los cuales son generados en los meses de julio a diciembre.



*Ilustración 3.7 Análisis temporal de la presión a lo largo del año.*  
 Fuente datos: <https://tcktcktck.org/bolivia/santa-cruz/san-ignacio-de-velasco>  
 Elaboración propia.

### 3.1.2. Análisis de la temperatura versus el porcentaje de humedad.

Para el siguiente análisis se tomaron los datos de temperatura y humedad promedio anuales, los cuales fueron llevados a valor porcentual con el fin de observar el comportamiento de la humedad con relación a la temperatura a lo largo de los años.

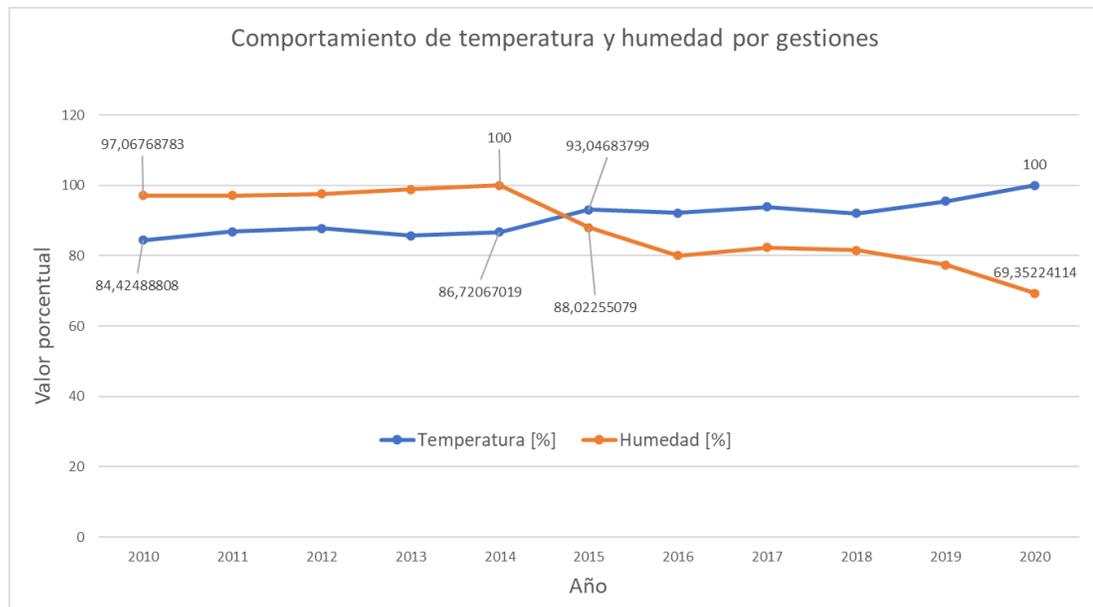
Gestión	Temperatura	Humedad	Temperatura [%]	Humedad [%]
2010	24,3222	75,0027	84,42	97,07
2011	25,0059	75,0795	86,80	97,17
2012	25,2911	75,4153	87,79	97,60
2013	24,6882	76,3616	85,70	98,83
2014	24,9836	77,2685	86,72	100,00
2015	26,8061	68,0137	93,05	88,02
2016	26,5338	61,8169	92,10	80,00
2017	27,0485	63,6630	93,89	82,39
2018	26,5081	63,0219	92,01	81,56
2019	27,5265	59,8055	95,55	77,40
2020	28,8092	53,5874	100,00	69,35

*Tabla. Datos anuales promedio de presión para el municipio de San Ignacio de Velasco 2010 al 2020.*

*Fuente. <https://tcktcktck.org/bolivia/santa-cruz/san-ignacio-de-velasco>  
Elaboración propia.*

En la siguiente ilustración se puede observar que tanto para el comportamiento de la temperatura y humedad existe un desarrollo cuasi normal hasta la gestión 2014, ya que el valor porcentual de la temperatura no excede los valores de humedad, sin embargo, a partir del año 2015 existe un punto de corte donde la temperatura supera a la humedad, lo cual es debido a las enormes cifras de incendios que se han generado en los últimos años en el Municipio de San Ignacio de Velasco.

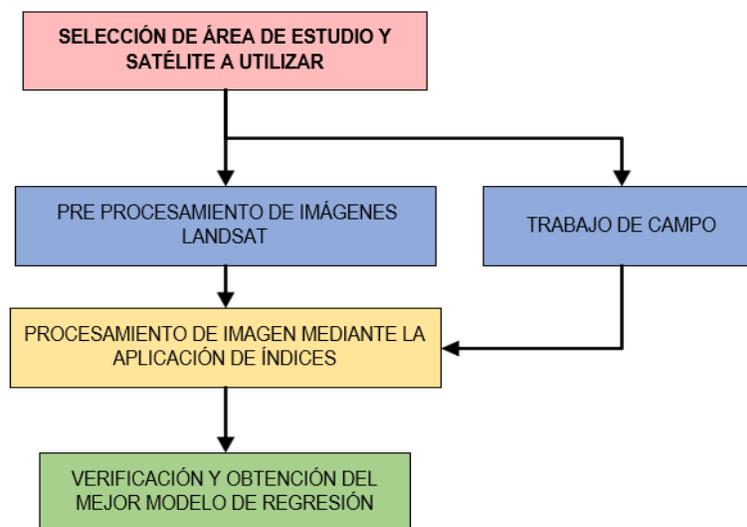
Este punto de quiebre nos demuestra que actualmente los incendios forestales tienen alta repercusión en la temperatura y la humedad de la superficie por lo cual la determinación de la severidad no solo será necesario para medir el grado de afección hacia el suelo, también será un indicador de la calidad medioambiental que tiene en nuestra sociedad.



*Ilustración 3.8 Comportamiento de la temperatura y humedad para las gestiones 2010 al 2020*  
*Fuente datos: <https://tckctck.org/bolivia/santa-cruz/san-ignacio-de-velasco>*  
*Elaboración propia.*

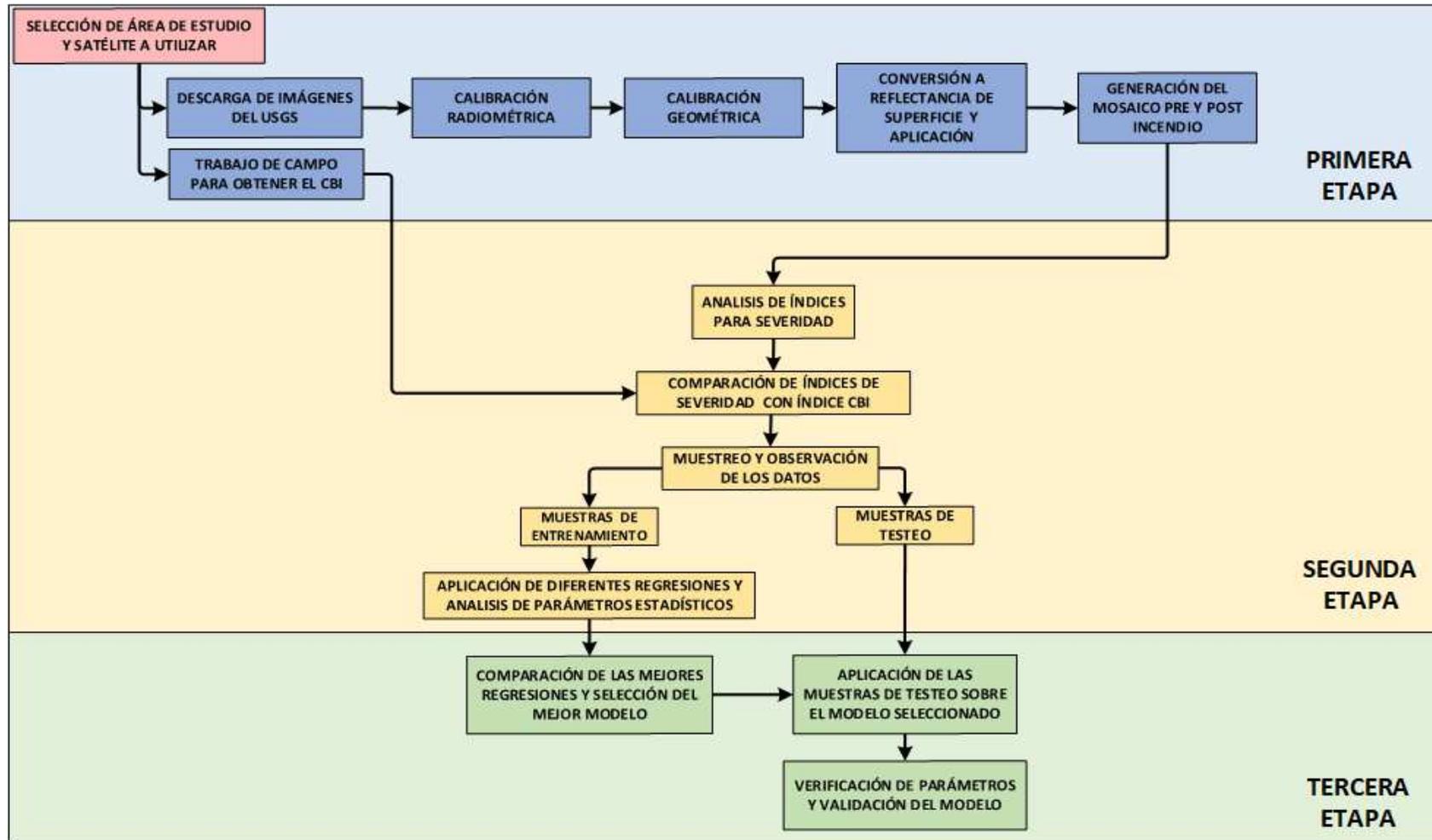
### 3.2. Ingeniería de proyecto para el procesamiento de imágenes.

Para un mejor entendimiento del proceso por el cual pasara toda la imagen, se tiene el siguiente esquema.



*Ilustración 3.9 Diagrama de bloques para la Ingeniería de proyecto.*  
*Fuente: Elaboración propia*

Haciendo más detalle en cada una de las fases se tiene el siguiente diagrama donde se dividió el estudio en tres partes.



*Ilustración 3.10 Diagrama de bloques detallado para la Ingeniería de proyecto*  
 Fuente: Elaboración propia

Para el proyecto se utilizó Software RStudio, que con sus diferentes herramientas nos permite mapear y estimar la severidad generada en los suelos por la residencia del fuego. Las siguientes instrucciones nos permite desarrollar el algoritmo para el procesamiento de la imagen.

- Obtención de imágenes satelitales del Servicio Geológico de los Estados Unidos.
- Corrección del metadato en el block de notas y cargar las imágenes en Software Envi.
- Aplicar la Calibración Radiométrica y guardar las imágenes en nivel de radiancia.
- Realizar la Corrección Geométrica igualando la zona al sistema UTM.
- Aplicar la corrección atmosférica por el método FLAASH y almacenar las imágenes en formato TIF.
- Cargar las imágenes en RStudio definiendo la ubicación de los archivos.
- Cortar las imágenes con la función “drawpoly”.
- Igualar orígenes y coordenadas de las imágenes con la función “sptransform”.
- Cargar el Shape file del Municipio de San Ignacio de Velasco, en este archivo también se debe igualar las coordenadas.
- Realizar el cropeo y enmascaramiento de la imagen con referencia al Shape file, el mismo se lo realiza con la función “crop” y “mask”.
- Aplicar los índices; NBR, DNBR, RBR y RDNBR mediante las operaciones algebraicas de bandas.
- Cargar los datos CBI, luego extraer y georreferenciar puntos de muestreo. Los mismos datos se los debe dividir en muestras de testeo y muestras de entrenamiento.
- Aplicar regresiones múltiples con las muestras de entrenamiento y valores de índices.
- Seleccionar el mejor modelo de las diferentes regresiones con el criterio de información de akaiken.
- Aplicar el mejor modelo seleccionado sobre las muestras de entrenamiento y verificar parámetros R ajustado y RMSE.
- Aplicación del modelo sobre el mapa del Municipio de San Ignacio de Velasco.

El algoritmo para este propósito se presenta a continuación:

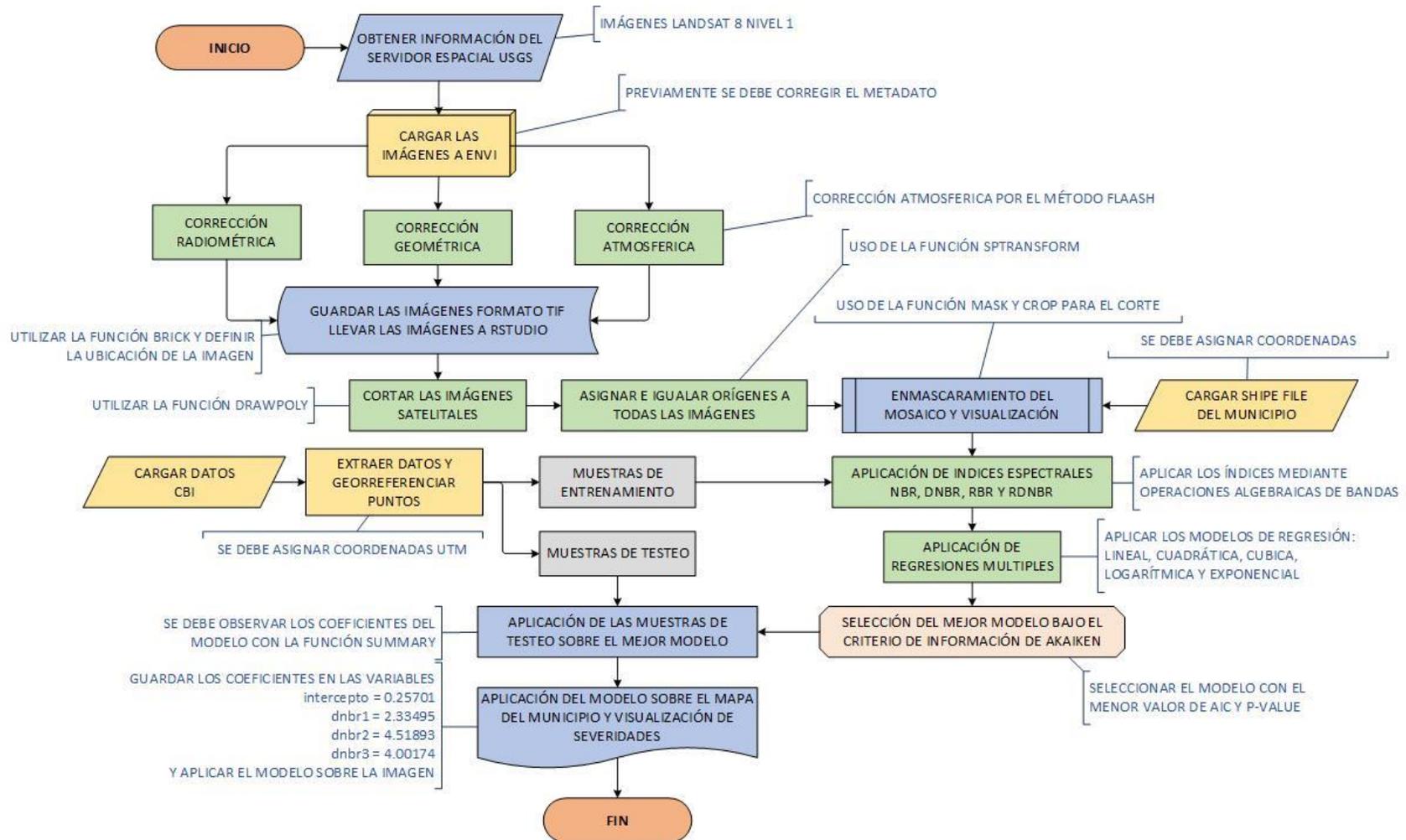


Ilustración 3.11 Diagrama de flujo del Algoritmo para el procesamiento de las imágenes Landsat 8  
Fuente: Elaboración propia

### **3.3. Selección de área de estudio y satélite a utilizar.**

#### **3.3.1. Aspectos para la selección del área de estudio.**

Para la selección de nuestra área de estudio se eligió el municipio de San Ignacio de Velasco, por las siguientes razones:

- En la gestión 2022 el mencionado municipio fue considerado como zona de alta emergencia por los incendios suscitados en los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre. Debido a que muchos de los incendios fueron registrados en el Municipio de San Ignacio de Velasco, el acceso a las áreas de los incendios era complejo, por los diferentes tipos de vegetación presentes en el área, por la topografía de la zona y también porque había diversas áreas pantanosas en los lugares de los incendios los cuales impedían el acceso y el control de los mismos. Por lo cual, el incendio de San Ignacio de Velasco fue catalogado como de alto grado de severidad y mayor número de áreas afectadas.
- Uno de los puntos más críticos se encuentra en el Parque Nacional Noel Kempff Mercado, ya que este es uno de los espacios naturales más importantes del país y hasta la fecha 5 de septiembre del 2022, según el Observatorio Chiquitano de la Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano (FCBC), se quemaron 42,320 hectáreas del parque nacional, ubicado en el departamento de Santa Cruz. [47]
- Según el observatorio de la FCBC se detectó que el 81% de estas áreas quemadas también fueron afectadas por los incendios del año 2020, cuando Bolivia alcanzó el récord de afectaciones por incendios: cuatro millones de hectáreas destruidas por el fuego. [47]
- Se tenía fácil acceso al municipio de San Ignacio de Velasco, por lo cual no habría dificultad en realizar un trabajo de campo para la obtención del índice CBI.
- Normalmente, un estudio de severidad en los suelos por incendios forestales puede ser abordado mediante una evaluación inicial o evaluación extendida, sin embargo, realizar una evaluación inicial no siempre es posible, esto debido a que existe mucha dificultad de acceso a las áreas de estudio posterior al incendio, ya que los mismos se encuentran en una fase de recuperación o diferentes autoridades no permiten el acceso

al mismo. Para nuestro caso existió la posibilidad de realizar una evaluación inicial en el área, debido a que nuestra área se encontraba en una zona de fácil acceso, y el incendio ya había sido controlado y extinguido, por lo cual hacer una medición de severidad en esta área nos ayudara a obtener datos que son muy cercanos a la fecha del incendio y por consiguiente obtener resultados de mayor precisión.

### **3.3.2. Factores tomados en cuenta para la selección del satélite Landsat 8.**

Actualmente existen varios satélites utilizados para la Teledetección sin embargo cada uno de estos presentan diferentes características, ventajas y desventajas a la hora de elegir un tema de estudio. Para el caso de un análisis de la severidad en los suelos se seleccionó el satélite Landsat 8 por las siguientes razones:

- Principalmente el acceso a la descarga de las imágenes del Landsat 8 es gratuito, libre e inmediato, sin embargo, muchas otras plataformas tienen desventajas como la espera a una solitud de las imágenes y bajos niveles de resolución.
- El sensor OLI del satélite Landsat tiene buena resolución radiométrica, esto indica que el sensor puede captar mayor número de niveles de grises, por lo cual, puede hacer mejores representaciones de las áreas.
- La lectura de los metadatos del Landsat 8 es fácilmente procesado en diferentes Softwares como también su tiempo de procesado para la corrección atmosférica no es largo.
- Finalmente, uno los mayores motivos por el cual se hizo uso de este satélite. Tras la búsqueda y lectura de diferentes estudios, papers, e investigaciones con relación a la severidad de los incendios en los suelos, los diversos autores recomiendan hacer uso del satélite Landsat ya que se presentaron resultados de mayor precisión, rendimiento y de mayor fiabilidad respecto a los estudios realizados con otros tipos de satélites. Por lo cual una mayoría de los estudios son realizados con el satélite Landsat.

Con los diferentes factores ya mencionados se optó por hacer selección del Satélite Landsat 8 y con imágenes en nivel 1, que son imágenes sin ningún tipo de corrección.

### 3.4. Descarga de imágenes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Para la descarga de las imágenes Landsat se utilizó la plataforma USGS, donde nuestra área de estudio contempla 10 tomas, de las cuales cinco son imágenes del pre incendio y los restantes cinco corresponden al post incendio.



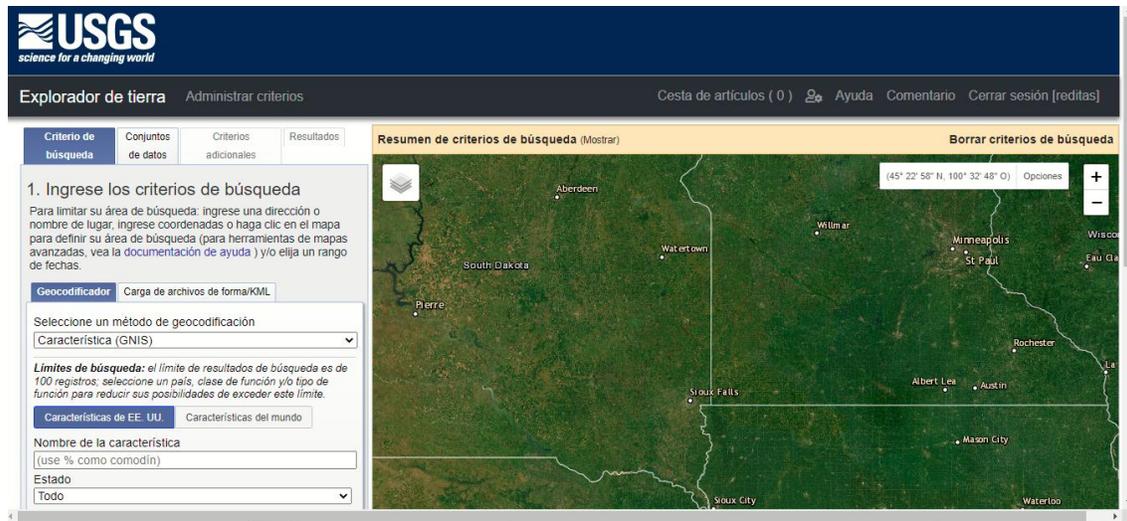
*Ilustración 3.12 Pagina para descarga de imágenes del USGS  
Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/>*

#### 3.4.1. Pasos para la descarga de imágenes Landsat 8 del USGS.

Primero. Como primer paso es necesario crear una cuenta en el USGS, para lo cual, es necesario acceder a la página oficial del USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), entonces en la parte superior derecha ingresamos a la parte de acceso y la misma nos llevara a otra ventana de registro, en esta página se deben llenar los datos y un correo electrónico al cual se tenga acceso para realizar la verificación. Una vez que se haya realizado correctamente el registro ya se tendrá una cuenta para proceder a la descarga de las imágenes.

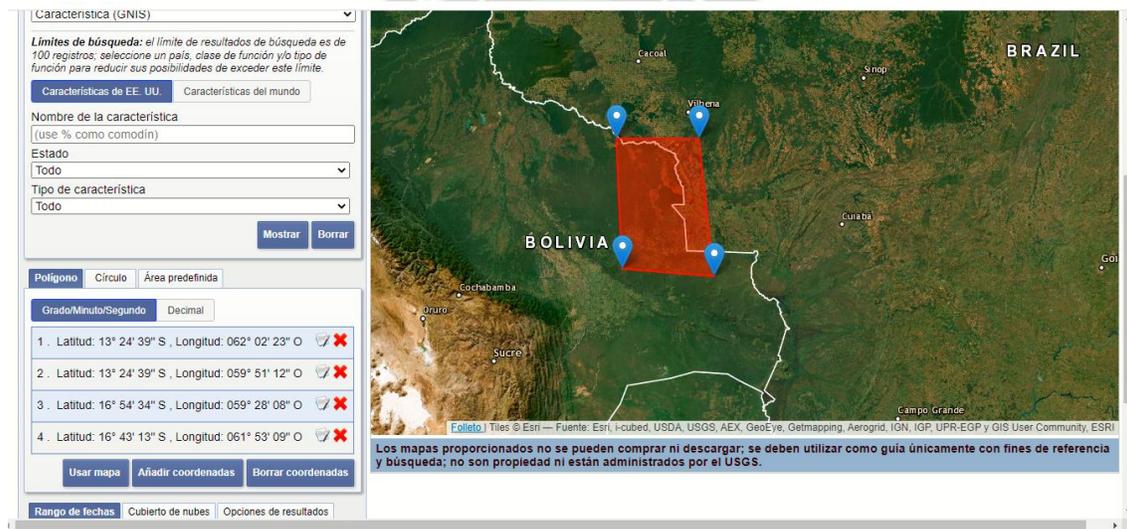
Segundo. Accedemos a la página anteriormente mencionada del USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) la cual nos permite descargar todas las imágenes Landsat generadas desde su lanzamiento, para nuestro caso se hará uso de imágenes Landsat 8.

En la página se presentará la siguiente ventana:



*Ilustración 3.13 Pestaña de presentación de la página del USGS  
Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/>*

En la ventana presentada con el cursor del mouse definimos el área que es de nuestro interés. Una vez que encontramos el área de estudio en el Departamento de Santa Cruz, Municipio de San Ignacio de Velasco, se debe trazar un área con el cursor de mouse los cuales son definidos por puntos. Si todo se realizó correctamente, se nos presentara en área con las coordenadas de los puntos de la siguiente manera:



*Ilustración 3.14 Selección de área en la página del USGS  
Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/>*

Tercero. Posteriormente pasamos a definir el CRITERIO DE BÚSQUEDA, la cual se puede definir en la parte superior izquierda de la pantalla, en este sector nos interesa definir:

El rango de fechas de la imagen que solicitamos. Del 1/10/2022 al 1/11/2022

La cobertura nubosa mínima para la imagen. Entre 0% y 20%

The image shows two side-by-side screenshots of the USGS Earth Explorer interface. The left screenshot shows the 'Polígono' (Polygon) tab with four coordinate points entered in the 'Grado/Minuto/Segundo' (Degrees/Minutes/Seconds) format. The right screenshot shows the 'Cubierto de nubes' (Cloud Coverage) tab, where the 'Rango de cobertura de nubes' (Cloud coverage range) is set to 0% - 20% using a slider. Below the slider, the 'Valores de cobertura de nubes desconocidos' (Unknown cloud coverage values) are set to 'Incluido' (Included). The interface also includes buttons for 'Usar mapa', 'Añadir coordenadas', 'Borrar coordenadas', 'Conjuntos de datos', 'Criterios adicionales', and 'Resultados'.

*Ilustración 3.15 Pestaña para definir el rango de fechas y cobertura de nubes de un área en el USGS.*

*Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/>*

Una vez que se definió la fecha y cobertura de nubosidad nos dirigimos al área conjunto de datos en el cual definiremos el satélite del cual se requiere descargar las imágenes.

En este apartado seleccionamos:

***Landsat / Colección Landsat 2 Nivel-1 / Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L1***

Y presionamos el botón de resultados.

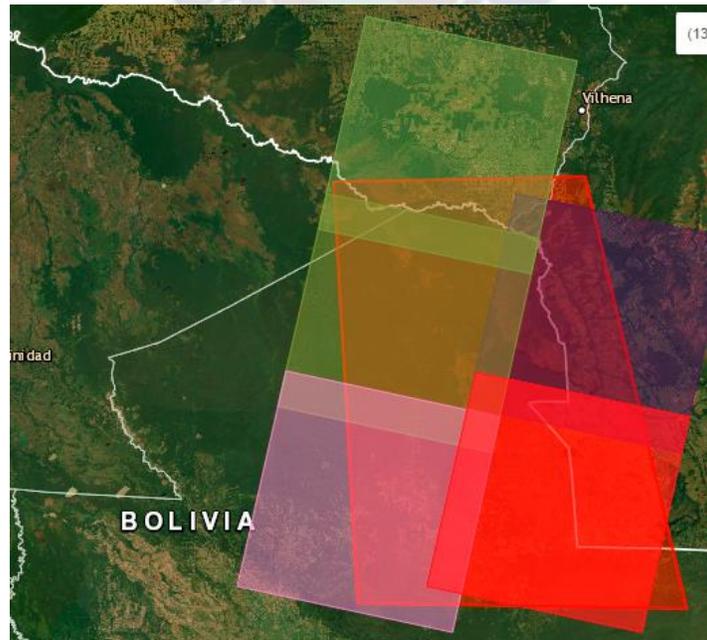
En la pestaña de resultados se nos mostrara los mapas encontrados con las características que se escogieron.

Existen diferentes opciones para visualizar las imágenes, ya que estás ocupan una determinada área en nuestro campo de trabajo.



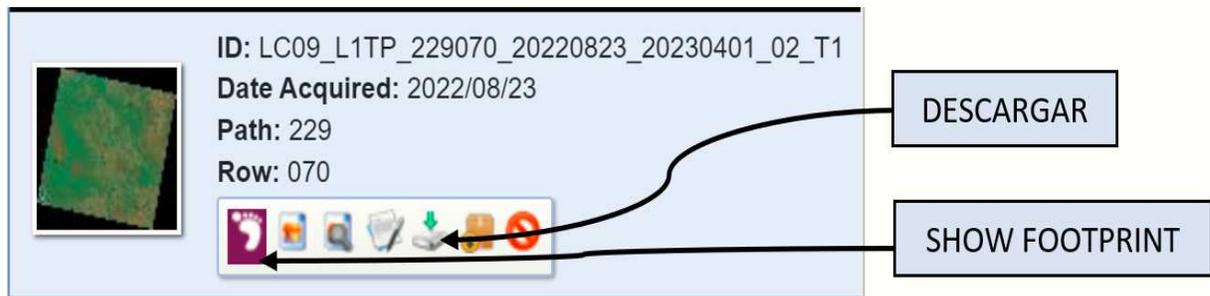
*Ilustración 3.16 Pestaña para definir el Satélite de descarga y observación de los resultados hallados en el USGS.  
Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/>*

La más importante de ellas es el símbolo SHOW FOOTPRINT el cual marca el área al cual pertenece cada imagen. Con esta herramienta nos ayudamos para buscar todas las tomas que usaremos para nuestra área de estudio.



*Ilustración 3.17 Observación de diferentes tomas del municipio de San Ignacio de Velasco.  
Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/>*

Como se puede observar en la imagen anterior se ve cada una de las tomas necesarias del Landsat para generar nuestra área de estudio.



*Ilustración 3.18 Opciones de descarga para las imágenes del USGS*  
*Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/>*

Finalmente, con la opción DESCARGAR podemos acceder al archivo el cual contiene la imagen y todos sus complementos para realizar el preprocesamiento.

Es necesario mencionar que cada una de las tomas llegan a ocupar un espacio superior a 1 GB, por lo cual se recomienda descargar toma por toma para no saturar nuestro equipo, como también tener el espacio suficiente.

### **3.4.2. Corrección del metadato**

Al momento de abrir el metadato de la imagen Landsat en el Software Envi el mismo no se abre y nos lanza un error, esto debido a que el Software solo se encuentra preparado para abrir imágenes del Landsat 7 y no se realizó una modificación para que las imágenes del Landsat 8 puedan ser abiertas. Sin embargo, una solución a este error es el cambio del título en el metadato. Entonces se procede a abrir el metadato como archivo .txt y se cambian unas líneas de texto como se muestra en las siguientes ilustraciones:

## METADATO ORIGINAL

```
LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_MTL: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
GROUP = LANDSAT_METADATA_FILE
GROUP = PRODUCT_CONTENTS
ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
DIGITAL_OBJECT_IDENTIFIER = "https://doi.org/10.5066/P975CC9B"
LANDSAT_PRODUCT_ID = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1"
PROCESSING_LEVEL = "L1TP"
COLLECTION_NUMBER = 02
COLLECTION_CATEGORY = "T1"
OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
FILE_NAME_BAND_1 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B1.TIF"
FILE_NAME_BAND_2 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B2.TIF"
FILE_NAME_BAND_3 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B3.TIF"
FILE_NAME_BAND_4 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B4.TIF"
FILE_NAME_BAND_5 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B5.TIF"
FILE_NAME_BAND_6 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B6.TIF"
FILE_NAME_BAND_7 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B7.TIF"
FILE_NAME_BAND_8 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B8.TIF"
```

## METADATO MODIFICADO

```
LC_OK_08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_MTL: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
GROUP = L1_METADATA_FILE
GROUP = METADATA_FILE_INFO
ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
DIGITAL_OBJECT_IDENTIFIER = "https://doi.org/10.5066/P975CC9B"
LANDSAT_PRODUCT_ID = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1"
PROCESSING_LEVEL = "L1TP"
COLLECTION_NUMBER = 02
COLLECTION_CATEGORY = "T1"
OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
FILE_NAME_BAND_1 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B1.TIF"
FILE_NAME_BAND_2 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B2.TIF"
FILE_NAME_BAND_3 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B3.TIF"
FILE_NAME_BAND_4 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B4.TIF"
FILE_NAME_BAND_5 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B5.TIF"
FILE_NAME_BAND_6 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B6.TIF"
FILE_NAME_BAND_7 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B7.TIF"
FILE_NAME_BAND_8 = "LC08_L1TP_230071_20220822_20220923_02_T1_B8.TIF"
```

*Ilustración 3.19 Corrección del metadato de una imagen Landsat 8  
Fuente: Elaboración propia.*

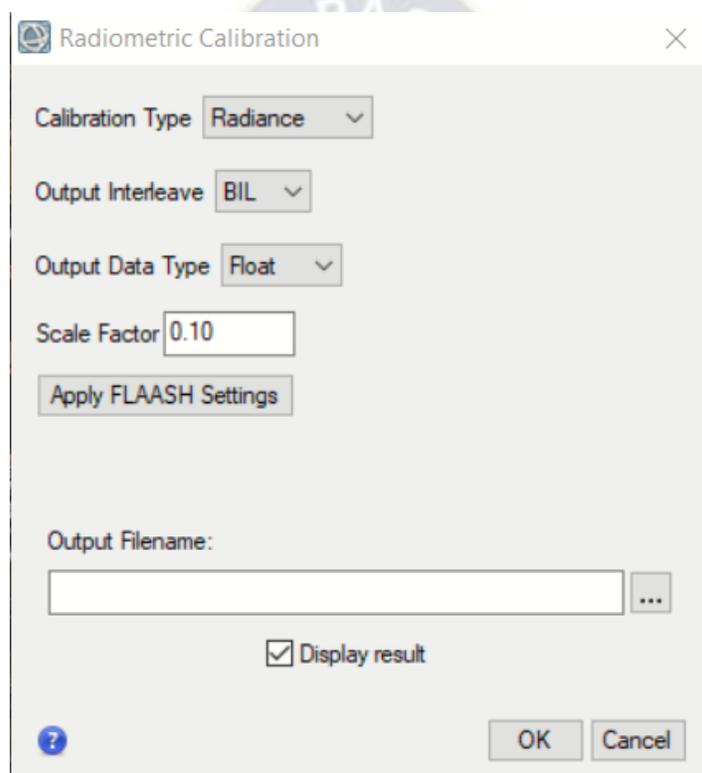
Con estas líneas cambiadas se podrá abrir el archivo en el software Envi y se podrá continuar con el pre procesamiento de la imagen.

### **3.5. Calibración radiométrica.**

Es necesario mencionar que cuando el sensor capta a la imagen satelital, este capta la radiación electromagnética pero estos valores se almacenan en valores discretos llamados niveles digitales, que son valores enteros positivos comprendidos en un intervalo definido por la resolución del sensor, todo este proceso lo realiza aplicando diferentes operaciones bajo diferentes constantes los cuales se encuentran en el metadato. Por lo cual el proceso de Calibración Radiométrica nos permitirá obtener los niveles de radiancia de la imagen aplicando nuevamente las constantes inicialmente aplicadas, pero de manera inversa.

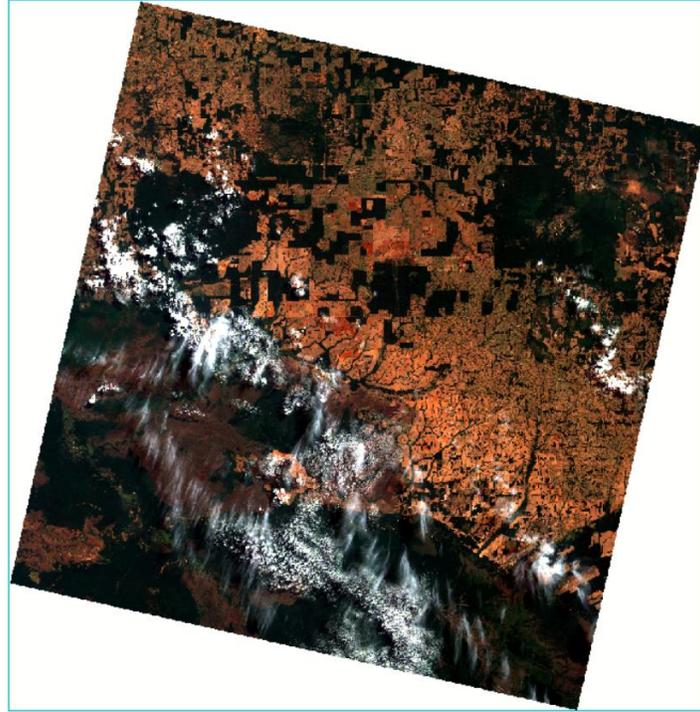
Una vez abierto el metadato de la imagen en ENVI accedemos a la barra de tareas que se encuentra en la parte superior derecha, en el mismo buscamos RADIOMETRIC CALIBRATION el cual nos apertura una ventana que nos pide elegir la imagen para aplicar la Calibración Radiométrica.

Cuando se haya seleccionado la imagen aparece una nueva ventana con diferentes opciones, en cual directamente podemos escoger la opción “Apply FLAASH Settings”, donde se aplicarán las configuraciones predeterminadas para el método FLAASH, posteriormente definimos una ubicación de salida de los archivos.



*Ilustración 3.20 Pestaña de calibración radiométrica en Software Envi  
Fuente: Elaboración propia*

Con todos los pasos realizados se nos generara diferentes archivos de la imagen Landsat los cuales ya se encuentran con la calibración radiométrica y en niveles en radiancia.



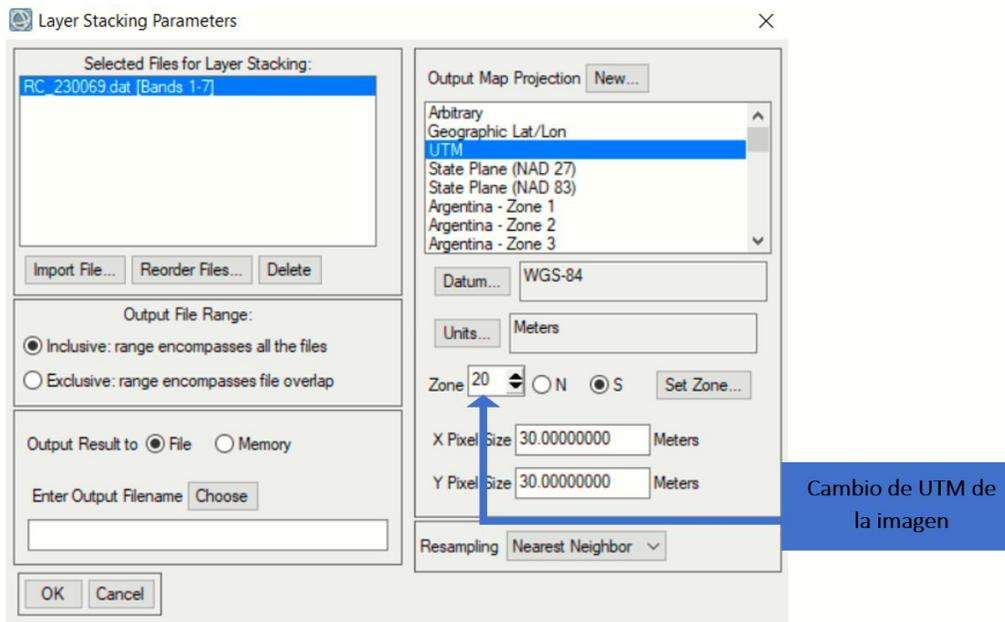
*Ilustración 3.21 Imagen Landsat calibrada con niveles de radiancia.  
Fuente: Elaboración propia*

### **3.6. Calibración geometría.**

Cuando se trabajan con diferentes tomas o imágenes de diferentes satélites es necesario una corrección geométrica de la imagen, es decir, todas las imágenes se deben encontrar sobre el mismo sistema de coordenadas. Para nuestro caso, debido a que todas las imágenes son de la misma plataforma el único problema que se presentó, fue que una de las imágenes se encontraba en el mismo sistema de coordenadas, pero en una zona diferente con relación a las otras imágenes.

Entonces para dar solución a este problema usamos la herramienta “Layer Stacking”, en el cual se nos abre una ventana donde nos pide elegir la imagen a procesar, y la opción de seleccionar las nuevas coordenadas en las cuales se quiere presentar dicha imagen. Cambiando su zona de UTM 21 a UTM 20 se nos generara una nueva imagen la cual es proyectada en la zona UTM 20.

Este proceso puede demorar varios minutos debido a que estamos trabajando con toda la toma y todas las bandas de nuestra imagen.



*Ilustración 3.22 Pestaña para cambio de zona en una imagen Landsat 8  
Fuente: Elaboración propia*

Tras la corrección de la zona en la imagen no se tendrá problemas en la unión de todas las tomas para la obtención de un mapa común.

### **3.7. Conversión a reflectancia de superficie y aplicación.**

#### **3.7.1. Corrección a reflectancia de superficie por el método Flaash.**

La corrección por el método FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), no solo nos permite eliminar diferentes factores que causan la alteración de los datos en la imagen, este tipo de corrección también es recomendado por el estándar del USGS para la corrección radiométrica de sus imágenes.

Algunos ejemplos comunes de errores y motivos por los cuales la imagen necesita una corrección serán descritos a continuación:

- Se podrá eliminar la componente del aerosol el cual se encuentra en la atmosfera
- Se podrá mejorar los niveles de radiancia ya que se obtendrá la reflectancia en el techo de la atmosfera TOA.
- Ayuda a reducir el ruido en los datos espectrales, lo que puede mejorar la calidad de la imagen final.

- Este método utiliza la información sobre la atmósfera y la geometría de la escena para estimar la cantidad de luz dispersada y absorbida por la atmósfera en cada píxel de la imagen.

Para el procesado de la imagen se tienen los siguientes pasos:

Escribimos la palabra "Flaash" en el campo de búsqueda de la Caja de herramientas.

Hacemos doble clic en el nombre de la herramienta FLAASH Corrección atmosférica que aparece.

En el cuadro de diálogo Parámetros FLAASH, hacemos clic en Ingresar imagen radiante y seleccionamos el archivo radiancia que se creó en la calibración radiométrica.

Cuando aparezca el cuadro de diálogo Factores de escala de irradiación, seleccionamos la opción Usar factor de escala individual para todas las bandas. Dejamos el valor del factor de escala individual como 1.000 y hacemos clic en Aceptar. ENVI ya ha aplicado el factor de escala correcto en la herramienta Calibración radiométrica, por lo que no necesita realizar ajustes aquí.

En el cuadro de diálogo Parámetros FLAASH, hacemos clic en Output Reflectance File y seleccionamos una carpeta y nombre de archivo para el archivo de reflectancia que FLAASH creará.

Seleccionamos un directorio de salida para archivos FLAASH que contengan varios archivos de procesamiento de FLAASH.

Proporcionamos un nombre de raíz para archivos FLAASH. Este nombre se añadirá a los archivos de procesamiento que crea FLAASH.

En los siguientes pasos ingresamos la información de la escena y del sensor

ENVI determina automáticamente la ubicación del centro de la escena a partir de los metadatos. No es necesario introducir las coordenadas Latitud y Longitud.

En la lista desplegable Tipo de sensor, seleccionamos Multiespectral / Landsat-8 OLI.

Los campos Altitud de sensor y Tamaño de píxel (m) se rellenan automáticamente.

Para nuestro caso la Elevación del terreno será de 0,42 Km, este dato lo tomamos de la herramienta Google Earth para localizar la elevación aproximada.

Para los datos de fecha y hora de adquisición nos dirigimos al metadato y buscamos la fecha y hora de adquisición, los cuales serán ingresamos en la información faltante de los parámetros de FLAASH.

Para la recuperación de aerosoles nos dirigimos al botón Multispectral Settings, donde como filtro de función (filter función file) utilizamos uno que tiene por defecto el programa, el cual se encuentra en la siguiente ubicación:

C:\Program Files\Exelis\ENVI53\resource\filterfuncs\landsat8\_oli.sli

Luego nos dirigimos a la pestaña Kaufman-Tanre Aerosol Retrieval, asignamos como valor por defecto la opción Over-Land Retrieval standard (660-2100 nm), y automáticamente el programa seleccionará las bandas.

Este método también sirve para estimar de forma más precisa la visibilidad presente en la imagen, por medio de la iteración de valores de visibilidad utilizando razones de cambio entre los valores de píxeles oscuros entre bandas cercanas a los 660nm y 2200nm, bandas las cuales son de suma importancia en nuestro estudio.

Luego aceptamos y esperamos a que realice la corrección atmosférica, igualmente esto puede demorar varios minutos por que se está trabajando sobre toda la imagen y sobre con todas las bandas.

Una vez aplicados los pasos mencionados obtenemos una imagen con un nivel de reflectancia en el techo de la atmosfera TOA, así también se puede visualizar que la nueva imagen es mucho más clara ya que se eliminaron diferentes componentes intrusivos de la atmosfera.

FLAASH Atmospheric Correction Model Input Parameters

Input Radiance Image: C:\Users\Asus\Desktop\teledeteccion img\FLASH\_PROY\_PRE\IMAGEN 230069\RC\_230069.dat

Output Reflectance File: C:\Users\Asus\AppData\Local\Temp\

Output Directory for FLAASH Files: C:\Users\Asus\AppData\Local\Temp\

Rootname for FLAASH Files: ROT\_230069\_

Scene Center Location: DD <-> DMS

Sensor Type: Landsat-8 OLI

Flight Date: Aug 21 2022

Lat: -13 0 56.10

Lon: -61 13 8.90

Sensor Altitude (km): 705.000

Ground Elevation (km): 0.42

Pixel Size (m): 30.000

Flight Time GMT (HH:MM:SS): 14 : 15 : 20

Atmospheric Model: Tropical

Aerosol Model: Tropospheric

Water Retrieval: No

Aerosol Retrieval: 2-Band (K-T)

Water Column Multiplier: 1.00

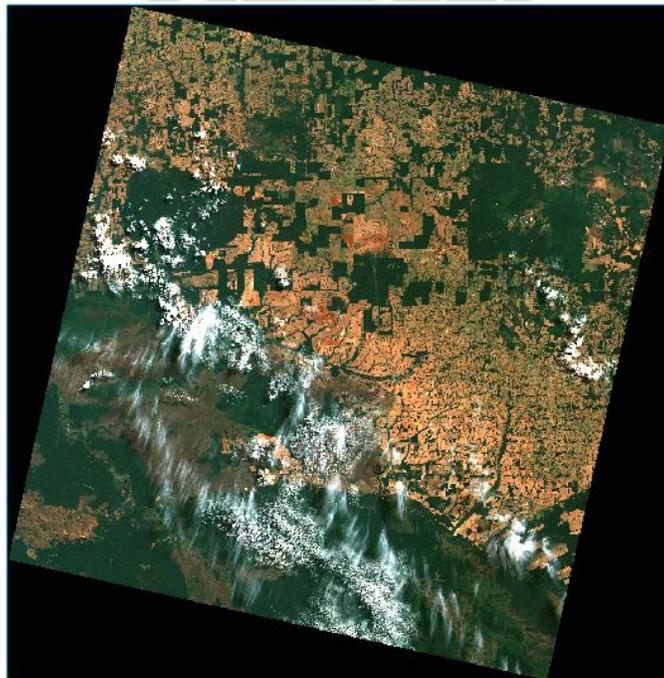
Initial Visibility (km): 40.00

Apply Cancel Help

Multispectral Settings... Advanced Settings... Save... Restore...

*Ilustración 3.23 Pestaña para la aplicación del método Flaash en Software Envi.*

*Fuente: Elaboración propia.*

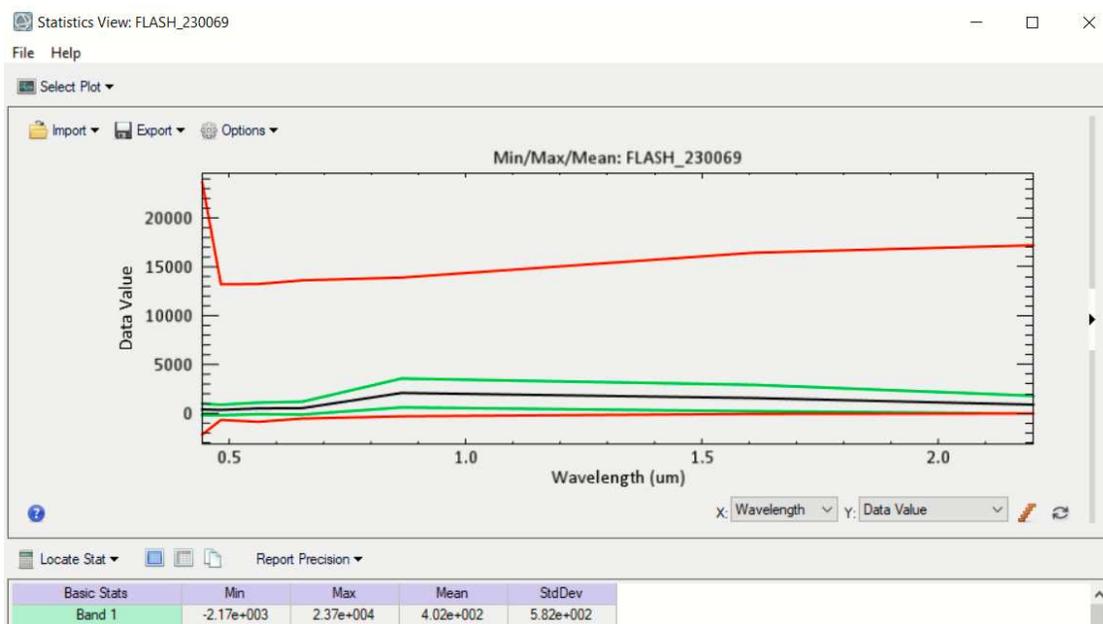


*Ilustración 3.24 Imagen Landsat 8 con corrección por el método Flaash.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.7.2. Normalización en la escala de reflectancia de superficie.

Si utilizamos la herramienta “compute statistics” y la aplicamos sobre nuestra imagen con reflectancia TOA podemos observar que los niveles se encuentran entre -8000 y 20000, valores los cuales no se encuentran normalizados debido a que son muy variables en todas las tomas.



*Ilustración 3.25 Ventana de visualización de niveles de reflectancia de una imagen.*

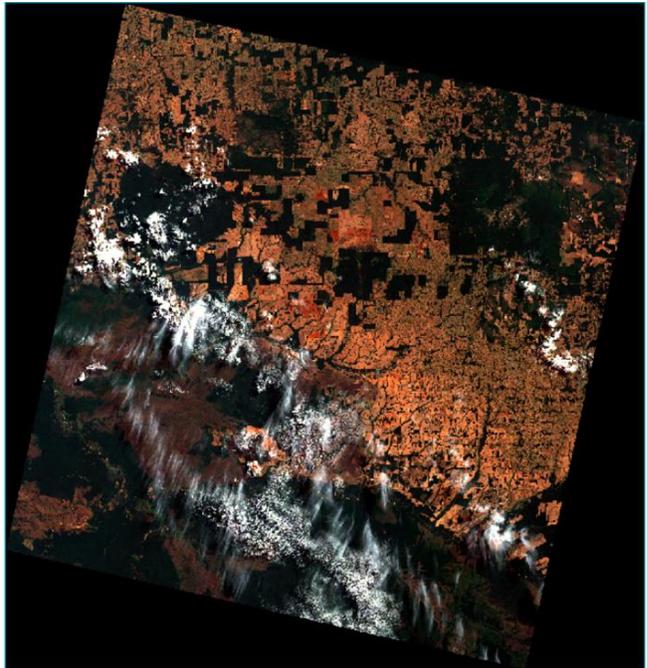
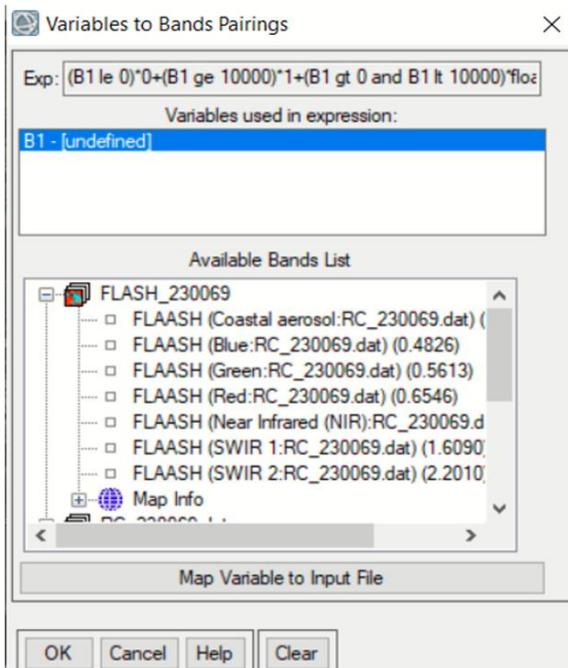
*Fuente: Elaboración propia.*

Como solución a dicho problema se aplicará una normalización con la herramienta Band Math, buscamos Band Math entre las herramientas y en la ventana emergente ingresamos la siguiente expresión:

$$(B1 \text{ le } 0) * 0 + (B1 \text{ ge } 10000) * 1 + (B1 \text{ gt } 0 \text{ and } B1 \text{ lt } 10000) * \text{float}(b1)/10000$$

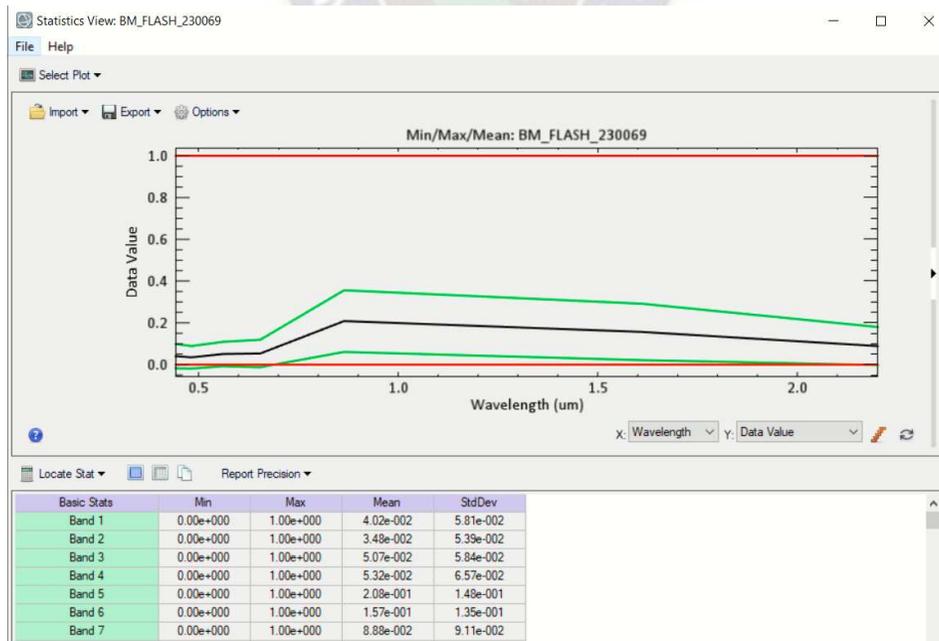
Luego nos pedirá la imagen a la cual se requiere aplicar la normalización, en este caso se seleccionará la imagen obtenida tras la aplicación del método Flaash, posteriormente iniciamos con la corrección.

Esta expresión nos ayudara a normalizar los valores de reflectancia TOA haciendo que los valores de estos sean entre 0 y 1.



*Ilustración 3.26 Ventana para la normalización de los niveles de reflectancia, e imagen Landsat tras la normalización de sus niveles de reflectancia.  
Fuente: Elaboración propia.*

Si aplicamos nuevamente la herramienta “compute statistics” observamos lo siguiente:



*Ilustración 3.27 Visualización de los niveles de reflectancia normalizados de una imagen Landsat.  
Fuente: Elaboración propia.*

Como se observa en la ilustración los niveles de la reflectancia cambiaron entre 0 y 1.

Con este cambio en los valores a todas las imágenes será posible hacer un mosaico y obtener nuestra área de estudio.

### 3.8. Generación del mosaico Pre y Post incendio en Software R Studio.

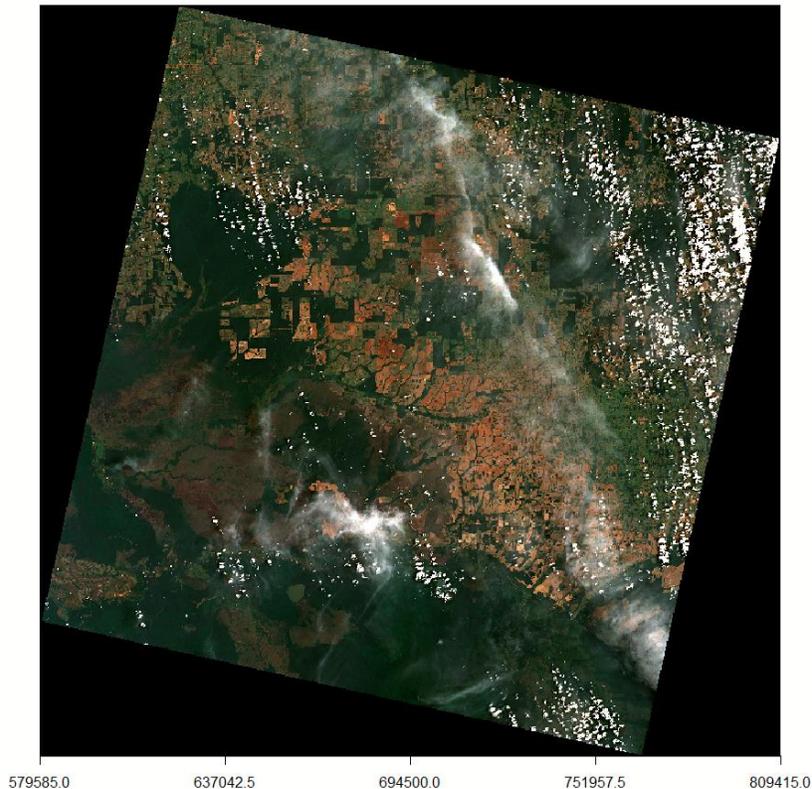
Debido a que en el software Envi es muy pesado procesar las 5 tomas del área de estudio hemos recurrido a un software más robusto que es el R Studio, ya que el mismo tiene mejor capacidad de trabajar con varias tomas al mismo tiempo.

Primeramente, cargamos las librerías que vamos utilizar, luego se cargara las imágenes corregidas con el método Flaash en Envi y para asegurarnos que se cargaron bien las imágenes ploteamos una de las tomas.

```
1 library(rgdal)
2 library(RStoolbox)
3 library(raster)
4 library(sp)
5 library(rgdal)
6 library(sf)
7 library(rasterVis)
8 library(lattice)
9 library(latticeExtra)
10 setwd("D:/PROY_IMG")
11 #cargamos las imagenes PRE INCENDIO preprocesadas en ENVI
12 img1 = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_PRE/IMAGEN 230069/BM_FLASH_230069")
13 img2 = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_PRE/IMAGEN 230070/BM_FLASH_230070")
14 img3 = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_PRE/IMAGEN 230071/BM_FLASH_230071")
15 img4 = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_PRE/IMAGEN 229070/FLASH_229070_OK")
16 img5 = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_PRE/IMG 229071/229071_FLAASH_BM")
```

*Ilustración 3.28 Código del programa para cargar las imágenes en RStudio*  
*Fuente: Elaboración propia*

IMAGEN POST INCENDIO TOMA 1



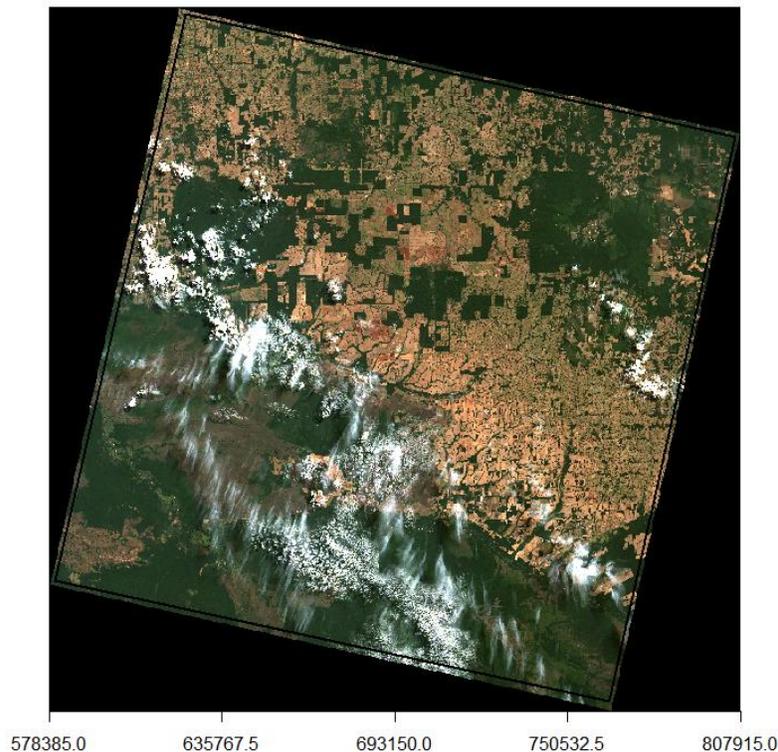
*Ilustración 3.29 Imagen Landsat con bordes negros graficada en RStudio*  
*Fuente: Elaboración propia*

En la anterior ilustración se puede observar que existen áreas oscuras del borde de la imagen, esto es debido a que en la corrección Atmosférica estos valores fueron leídos como NA que significa valor no disponible, por lo cual se aplicara el siguiente método para la eliminación de estos valores.

Utilizando la función “drawpoly” nos permite obtener la extensión un área de la imagen anteriormente graficada, esto lo realiza en base a puntos los cuales serán definidos con el cursor del mouse. Para este caso se debe tener mucho cuidado en no seleccionar las áreas oscuras de la imagen.

Cuando ya se haya definido la extensión del área que se quiere recortar se presiona la tecla escape y se nos marcara nuestra área seleccionada y la extensión será guardada en una variable que inicialmente ya se definió.

### IMAGEN PRE INCENDIO TOMA 1



*Ilustración 3.30 Imagen Landsat tras la aplicación de la función drawPoly  
Fuente: Elaboración propia*

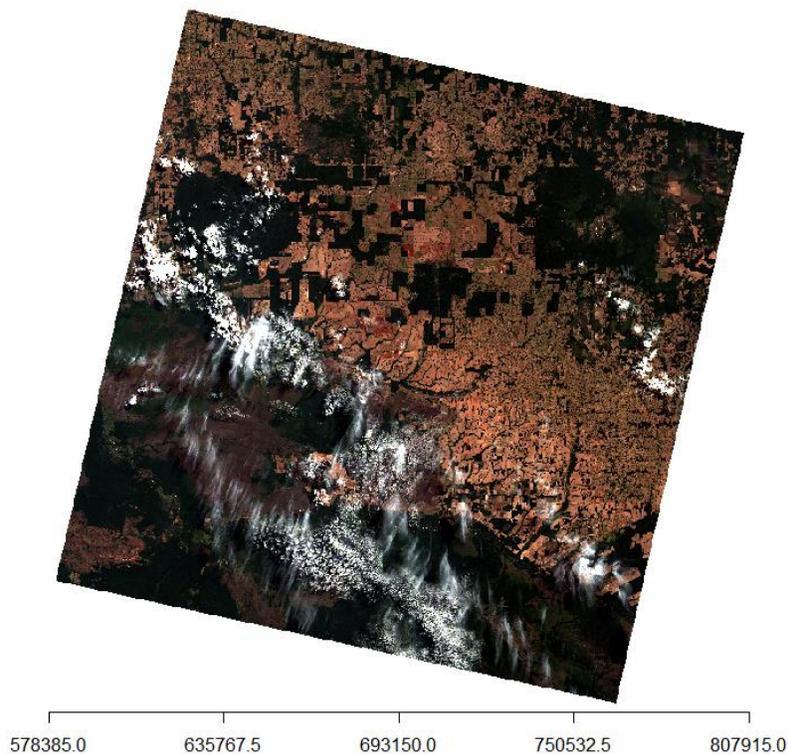
Como siguiente paso con la función “mask” se realizará un corte a la imagen original con relación a la extensión obtenida anteriormente, este proceso podría demorar dependiendo del tamaño de imagen, para verificar que el corte se realizó de manera correcta se graficó la nueva imagen y se observa que ya no presenta los bordes negros.

```
18 # ELIMINACION DE LOS BORDES NEGROS DE LAS IMAGENES LANDSAT 8
19 # Ploteamos la primera imagen de la toma 1
20 # Luego definimos un subset con contorno color negro y lo enmascaramos con la imagen original
21 # como resultado obtenemos la imagen landsat sin bordes negros los cuales podrian
22 # generar mala informacion en el area de estudio
23 plotRGB(img1, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="IMAGEN PRE INCENDIO TOMA 1")
24 subtl = drawPoly(show=TRUE, col="black")
25 subtl_im = mask(img1, subtl)
26 plotRGB(subtl_im, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="CORTE EN LA TOMA 1 PRE INCENDIO")
27 # ELIMINACION DE BORDES NEGROS EN LA TOMA 2
28 plotRGB(img2, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="IMAGEN PRE INCENDIO TOMA 2")
29 subtl2 = drawPoly(show=TRUE, col="black")
30 subtl2_im = mask(img2, subtl2)
31 plotRGB(subtl2_im, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="CORTE EN LA TOMA 2 PRE INCENDIO")
```

*Ilustración 3.31 Código del programa para eliminar bordes oscuros de la imagen Landsat.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### CORTE EN LA TOMA 1 PRE INCENDIO



*Ilustración 3.32 Imagen Landsat con corrección de los bordes negros en RStudio.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Se realiza el mismo procedimiento para todas las tomas Pre y Post incendio.

Cuando ya se haya realizado el corte en todas las tomas hacemos la comparación de los orígenes de las imágenes y en caso de no ser iguales los igualamos. También se realiza la comparación del sistema de coordenadas en el cual se encuentra una toma respecto a otra, como ya se corrigió ese punto en ENVI el sistema nos responde que la comparación es verdadera.

Ya verificados los orígenes y el sistema de coordenadas en el cual se encuentran las tomas, procedemos a realizar los mosaicos por partes, primero un mosaico de las tomas 1, 2, 4 y luego otro mosaico de las tomas 3, 5. Se realiza el mosaico por separado debido a que hacer trabajar al sistema con las 5 tomas a la vez podría saturarlo. Cuando ya se tengan ambos mosaicos se genera un mosaico final lo cual nos da como resultado una imagen con todas las tomas y la misma es almacenada en la variable de nombre `mosaico_3pre`.

```

47 # VERIFICACION DE LOS ORIGENES DE CADA SUBSET
48 origin(subt1_im)
49 origin(subt2_im)
50 origin(subt3_im)
51 origin(subt4_im)
52 origin(subt5_im)
53 # COMO EL SUBSET 4 ES DIFEENTE A LOS DEMAS, LO IGUALAMOS PARA REALIZAR EL MOSAICO
54 origin(subt4_im) = origin(subt5_im)
55 origin(subt4_im)
56 # REALIZAMOS EL MOSAICO DE LAS 5 TOMAS CON LA FUNCION MEAN
57 # LA FUNCION MEAN CALCULA UN PROMEDIO CUANDO EXISTE TRASLAPE DE INFORMACION DE PIXELES
58 mosaico_1pre = mosaic(subt1_im, subt2_im, subt4_im, fun= min)
59 mosaico_2pre = mosaic(subt3_im, subt5_im, fun= mean)
60 mosaico_3pre = mosaic(mosaico_1pre, mosaico_2pre, fun= mean)

```

*Ilustración 3.33 Código para verificación de orígenes y generación del mosaico de una imagen Landsat en RStudio.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Para el siguiente paso haremos uso de un shipe file. Un shipe file es un mapa donde se muestran los límites de un área determinada, el archivo shipe file también puede tener diferentes datos como lagos, puntos de referencia, zonas, etc. Para nuestro caso solo usaremos los límites de nuestra área de estudio.

Como ya se mencionó que es un shipe file se hará un manipuleo del mismo para lo cual cargamos un shipe file que contiene algunos municipios de Santa Cruz, en el cual se debe observar en que número de dato se encuentra el municipio de San Ignacio de Velasco, se observa que se encuentra en la posición 8, entonces extraemos y ploteamos el shipe file del municipio de San Ignacio de Velasco con relación a la posición 8.

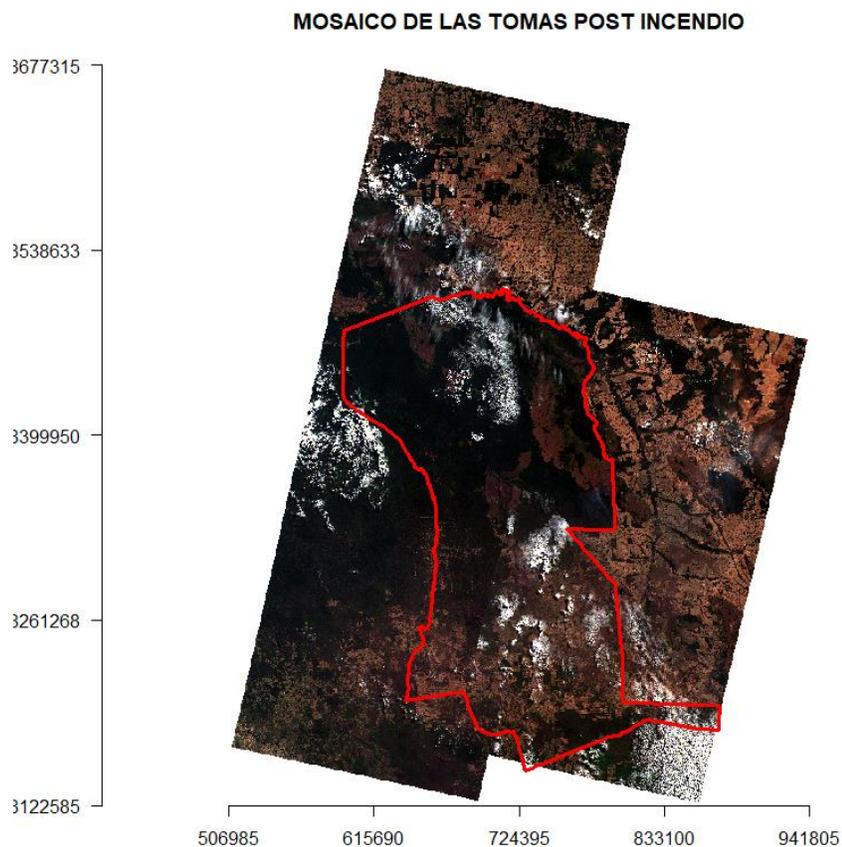
Ahora hacemos la comparación del sistema de coordenadas del shipe file extraído, con el sistema de coordenadas del mosaico, y como nos indica que no se encuentran en el mismo sistema de coordenadas, hacemos la transformación de un sistema de coordenadas a otro mediante su proyección, en este caso nos quedamos con el sistema de coordenadas de mosaico\_3pre. Se realiza nuevamente la comparación y ahora nos indica que ambos sistemas de coordenadas son iguales. Entonces ploteamos el shapefile del Municipio de San Ignacio de Velasco sobre el mosaico para observar la superposición de mapas.

```

64 #Cargamos el shipe file de algunos municipios de Santa Cruz
65 municipio=readOGR("C:/Users/Asus/Downloads/Municipio_FocoCalor14092020/Municipio_FocoCalor14092020/
66 Municipio_FocoCalor14092020.shp")
67 plot(municipio)
68 View(municipio@data) #observamos el id del municipio de SIV
69 municipio_8 = municipio[municipio$id == "8",] #Extraemos solo el municipio de SIV
70 plot(municipio_8) #shape file de San Ignacio de Velasco
71 #Comparamos las coordenadas e igualamos sus coordenadas entre el mosaico y
72 # el Municipio de San Ignacio de Velasco
73 compareCRS(municipio_8,mosaico_3pre)
74 municipio_CRS8 = spTransform(municipio_8, CRS(projection(mosaico_3pre)))
75 compareCRS(municipio_CRS8,mosaico_3pre)
76 #Ploteamos el shipe file sobre el mosaico para observar la superposicion
77 plotRGB(mosaico_3, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main ="MOSAICO DE LAS TOMAS POST INCENDIO")
78 plot(municipio_CRS8, border="red", lwd=3, add=TRUE)

```

*Ilustración 3.34 Código para importar y modificar un shapefile*  
*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 3.35 Imagen del mosaico y el Shapefile de San Ignacio de Velasco.*  
*Fuente: Elaboración propia.*

Finalmente, con la función “crop” hacemos el corte en “mosaico\_3pre” con relación al shipe file, como resultado solo nos dará el corte encuadrado de San Ignacio de Velasco y será almacenado en la variable “mosaico\_crop”, posteriormente con la función “mask” se realiza

el enmascaramiento de “mosaico\_crop”, con el shipe file, lo cual nos entrega como resultado la imagen final lista para ser procesada y realizar la clasificación supervisada.

```
80 #-----HACEMOS EL CORTE EN EL AREA FINAL, PERO EN RELACION AL SHIPE FILE
81 mosaico_crop = crop (mosaico_3pre, municipio_CRS8)
82 plotRGB(mosaico_crop[[4:2]],stretch="lin",axes=TRUE)
83 #---REALIZAMOS EN ENMASCARADO DEL AREA FINAL CON EL SHIPE FILE
84 #---GUARDAMOS EL ARCHIVO CON LA EXTENCION .TIF
85 mosaico_mask_pre = mask(mosaico_crop, municipio_CRS8, filename= "MOSAICO_FINAL_PRE_INCENDIO.TIF")
86 plotRGB(mosaico_mask_pre[[4:2]],stretch="lin",axes=TRUE)
```

*Ilustración 3.36 Código para el recorte de una imagen Landsat.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 3.37 Imagen pre procesada del Municipio de San Ignacio de Velasco (Pre incendio).  
Fuente: Elaboración propia.*

### IMAGEN POST INCENDIO SAN IGNACIO DE VELASCO

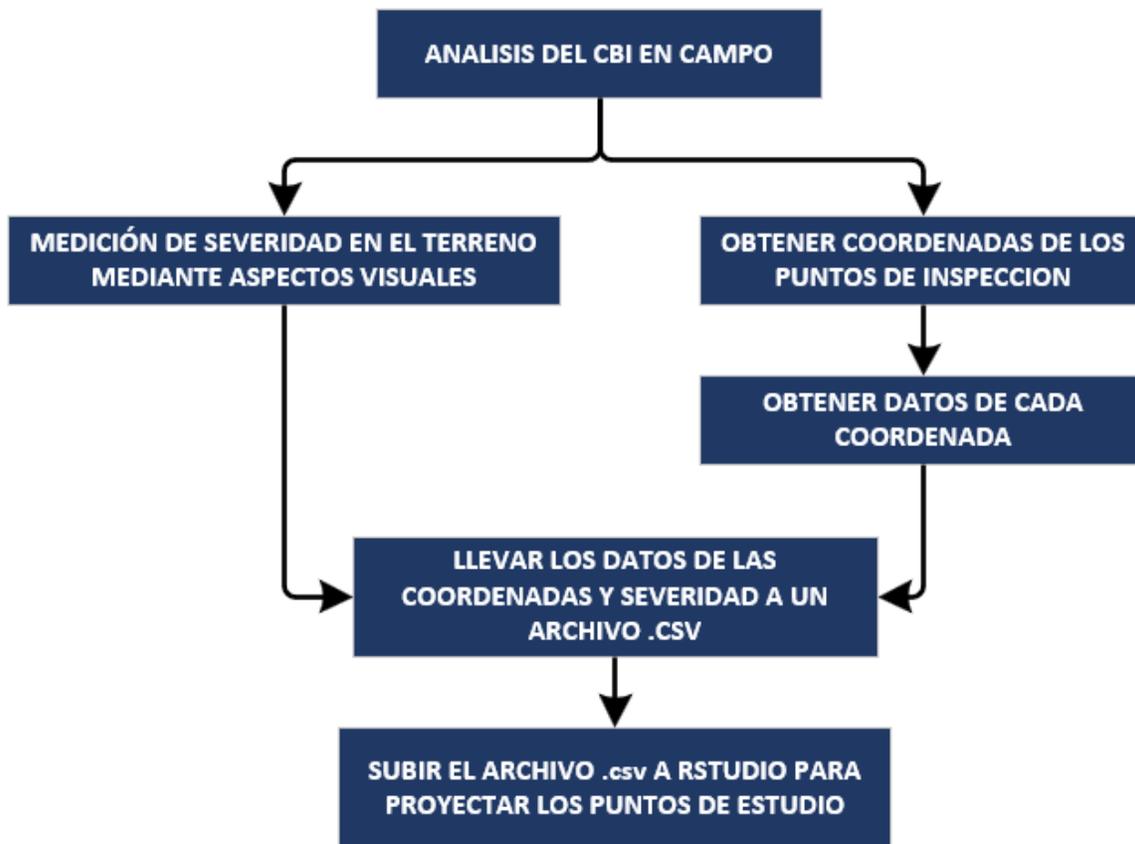


*Ilustración 3.38 Imagen pre procesada del Municipio de San Ignacio de Velasco (Post incendio).  
Fuente: Elaboración propia.*

### 3.9. Trabajo de campo para obtener el CBI (Compost Burn Index).

En cualquier estudio de Teledetección es necesario sustentar el trabajo con datos obtenidos mediante un trabajo de campo, en ese entendido, para darle solidez a nuestro trabajo se realizó un trabajo de campo, el cual consiste en inspeccionar el área de estudio y determinar de manera visual la severidad que existe en los diferentes puntos.

Para este punto presentamos el siguiente diagrama que detalla de trabajo para la obtención del índice CBI.



*Ilustración 3.39 Diagrama de bloques para obtener la severidad en campo.  
Fuente: Elaboración propia.*

Para este procedimiento se siguió la guía de Carl H. Key y Nate Benson, la cual realiza la medición de la severidad de manera visual en el área de estudio bajo diferentes características del campo como: Sustratos, Hierbas, arbustos bajos y árboles, Arbustos y árboles altos, Árboles intermedios, Árboles grandes.

Posterior a la determinación del CBI en los diferentes puntos en el campo, estos deben ser proyectados en el mapa para de esta manera obtener para cada coordenada la severidad medida en el campo (CBI), como también la severidad que se obtuvo mediante el índice aplicado.

### **3.9.1. Medición de la severidad en el terreno mediante aspectos visuales.**

Nuestra área de estudio fue determinada en el lado sur del Municipio de San Ignacio de Velasco, se eligió esta zona por diferentes factores como:

- La zona era de fácil acceso.
- Las dimensiones del incendio eran considerablemente altas, por lo cual se podía obtener diferentes tipos de severidad en el área.
- Los incendios en esta zona ya habían sido controlados y finalizados.
- Era posible realizar una evaluación inicial con el fin de que los datos sean de mayor fidelidad.
- En el área se encontró diferentes tipos de sustratos, hierbas y árboles, lo cual coincide con las características que menciona en guía de Key y Benson.

#### **3.9.1.1. Materiales de trabajo.**

Para nuestro estudio se hizo uso de los siguientes materiales.

GPS: Con el GPS se tomarán las coordenadas de cada punto de trabajo, en este caso de utilizo el GPS del celular.

Cinta métrica: Para la medición de cada área de trabajo.

Cinta de borde: Necesario para delimitar el área de cada punto.

Estacas: Los cuales nos ayudaran con el tendido de la cinta de borde.

Hojas de datos: Para la anotación de las diferentes severidades observadas por cada punto.

#### **3.9.1.2. Preparación del terreno.**

Inicialmente, se buscó áreas homogéneas con el fin de facilitar la medición y observación de los diferentes tipos de severidad. Para las dimensiones de cada área de trabajo se siguió la recomendación que da el método CBI, en el cual indica que debe ser el mismo tamaño que la resolución espacial del satélite utilizado, en nuestro caso es de:  $30[m] \times 30[m]$  con un área total de  $900 [m]^2$ .



*Ilustración 3.40 Medición del área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia.*

Se fijo las estacas en cada vértice del cuadrado, para posteriormente delimitar nuestra área con la cinta de bordeo.



*Ilustración 3.41 Delimitación del área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 3.42 Área de estudio con alta severidad.  
Fuente: Elaboración propia.*

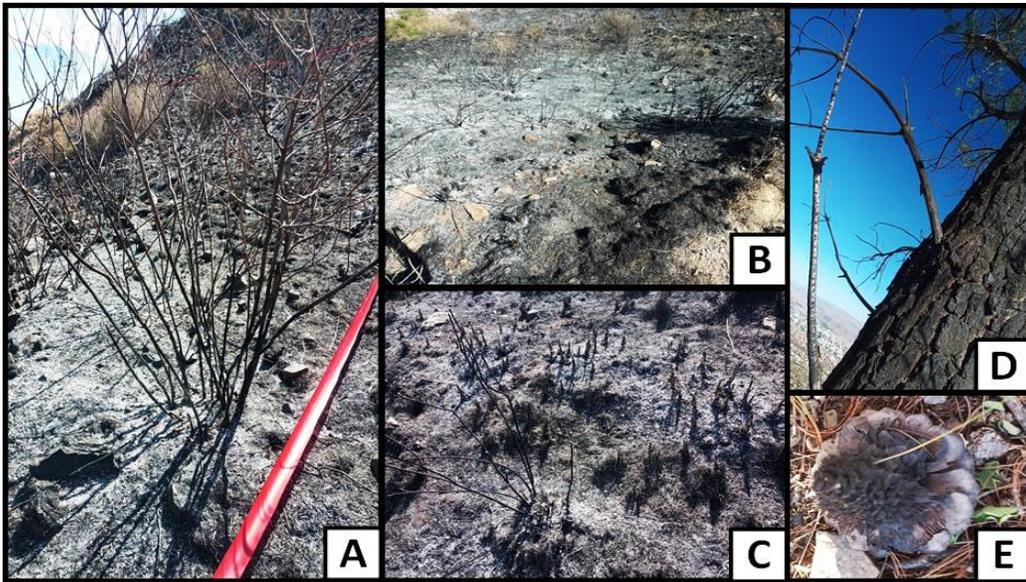
### **3.9.1.3. Observaciones en las diferentes áreas de severidad.**

Para nuestro trabajo de campo se tomó 4 tipos de severidades las cuales son:

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

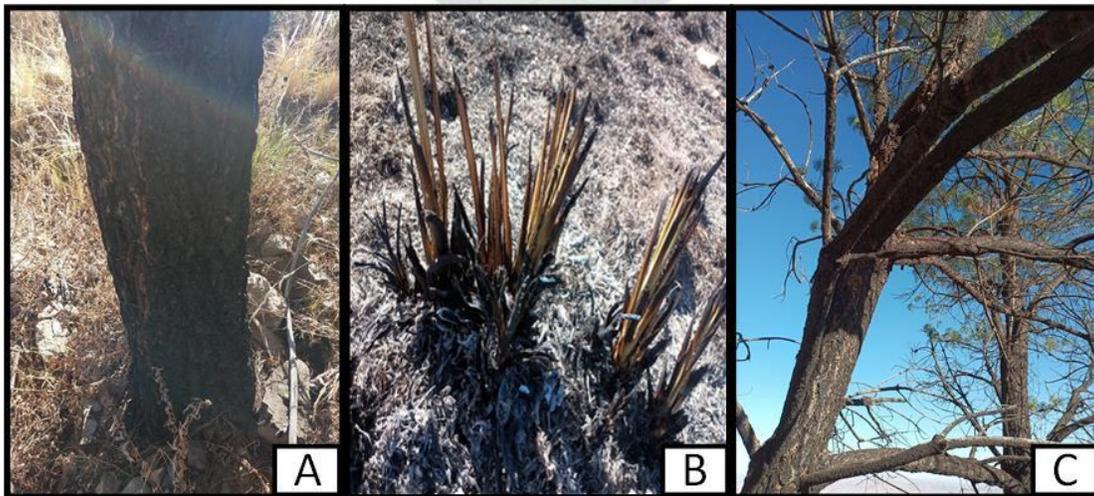
*Ilustración 3.43 Niveles de severidad para el índice CBI.  
Fuente: Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano  
Recuperado de:  
[https://www.fcbc.org.bo/wpcontent/uploads/2021/07/2021\\_MetodologiaRegeneracionBSCh-1.pdf](https://www.fcbc.org.bo/wpcontent/uploads/2021/07/2021_MetodologiaRegeneracionBSCh-1.pdf)*

Para las áreas de alta severidad se buscó las áreas con mayor calcinación de la vegetación, en estas áreas se observó las marcas y cicatrices de quemado tanto en el suelo como en los árboles. En este tipo de severidad el fuego llegó a quemar parcial y totalmente los árboles donde la cantidad de hojas en cada árbol era casi nula. La pérdida de la materia vegetal del suelo fue total y se pudo evidenciar inicios de una posible erosión del suelo, los casos de erosión mayormente se observaron en lugares donde la vegetación inicial en el suelo era casi nula por lo cual el fuego llegó a dañar su materia orgánica.



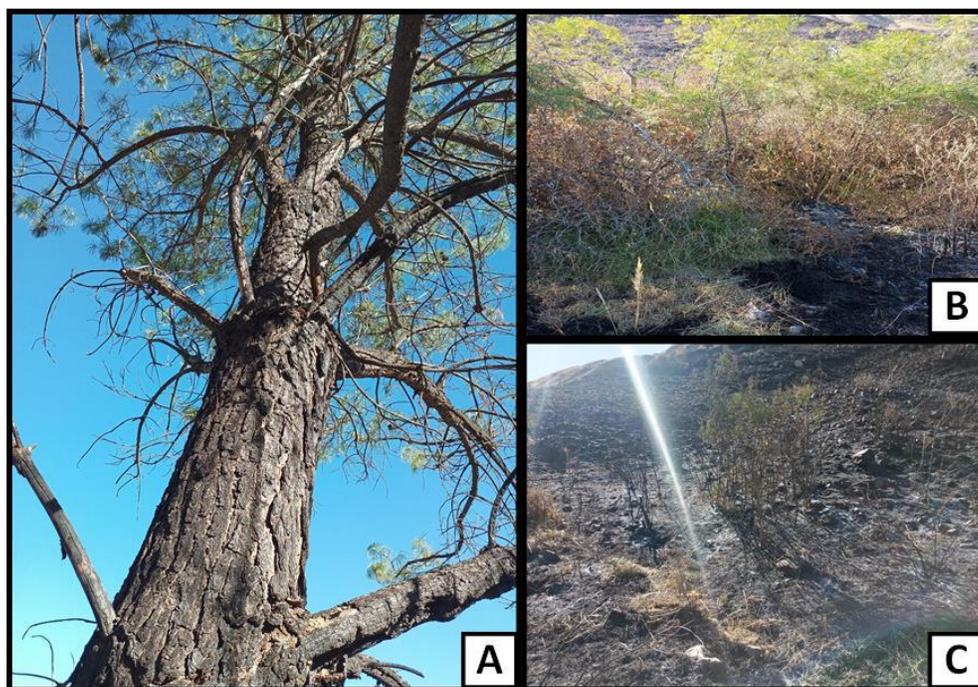
*Ilustración 3.44 Observación de áreas con severidad alta.  
Fuente: Elaboración propia.*

Para el caso de áreas con severidad moderada la calcinación llegó hasta la mitad de los árboles o incluso más, y se podía observar que las copas de los árboles aun contenían vegetación viva, sin embargo, la calcinación por debajo del árbol era considerablemente alta. En el caso de los suelos se produjo una notable pérdida de los sustratos del suelo, aun así, existía una cantidad considerable de hierbas en el suelo con sus raíces aun vivas, lo cual nos indica que con el pasar del tiempo la vegetación puede recuperarse.



*Ilustración 3.45 Observación de área con severidad moderada.  
Fuente: Elaboración propia.*

Para el caso de severidad baja se observó que no ocurrieron daños en los árboles, los daños únicamente se dieron en la vegetación del suelo como; sustratos, hierbas, arbustos los cuales no se calcinaron por completo, sin embargo, se observó un gran cambio en su cubierta de verde a marrón y en algunos casos negro.



*Ilustración 3.46 Observación de áreas con baja severidad.  
Fuente: Elaboración propia.*

En todos los tipos de severidad se consideró las observaciones mencionadas y se llenó las hojas de datos proporcionadas por el método de evaluación CBI.

Es necesario mencionar que se para los últimos tipos de severidad del método de evaluación CBI, se los considero como un solo tipo, esto por las dificultades en la clasificación de severidad moderada alta y severidad alta, sin embargo, estas dos severidades se mostraran como severidad alta, lo cual es completamente valido para el método de Key y Benson.



*Ilustración 3.47 Observación y medición de los diferentes tipos de severidad.*

*Fuente: Elaboración propia.*

En cada punto de estudio se tomó las coordenadas de latitud y longitud con ayuda de la aplicación Google Maps.

Finalmente, se procedió a realizar la suma y promedio de cada uno de los valores de severidad en las hojas de datos obteniendo así un nivel de severidad por cada punto de estudio.

Fórmula para el cálculo de índice CBI:

$$CBI_{total} = \frac{A + B + C + D}{N}$$

Donde:

A= CBI medido en los sustratos

B= CBI medido en sustratos bajos y arboles hasta 1 metro

C= CBI medido sustratos y arboles de 1 a 5 metros

D= CBI medido en arboles mayores a 5 metros, copas de árboles y doseles de árboles.

N= es el número de tipos de CBIs. medidos, en caso de que en un área solo se presente un tipo de CBI, este será considerado como CBI total.

### FORMULARIO PARA LA GRAVEDAD DE QUEMADURAS ÍNDICE DE QUEMADURAS COMPUESTO (CBI)

DATOS DEL AREA									
EXAMINADORES	Alex Salcedo Ticona				NUMERO DE AREA	1			
FECHA DE REGISTRO	26/11/2022				FECHA DE INCENDIO	06/11/2022			
DIMENSION DEL AREA	900 m2				NOMBRE DE FUEGO	San Ignacio			
DATO GPS	16°6'58.80"S,60°20'3.55"W								

ESTRATOS FACTORES DE CALIFICACION	ESCALA DE GRAVEDAD DE QUEMADURAS								
	SIN EFECTO	BAJO		MODERADO		ALTO			
	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0		
A. SUSTRATOS									
COMBUSTIBLE LIGERO CONSUMIDO	SIN EFECTO		30% CONSUMIDO		70% CONSUMIDO	3	100% CONSUMIDO	SUMA	6
CANTIDAD DE VEGETACION VIVA	SIN EFECTO		70% - 100%		30% - 70%	3	0% - 30%	PROMEDIO	3
B. HIERBAS ARBUSTOS BAJOS Y ARBOLES HASTA 1 METRO									
% FOLLAJE ALTERADO	SIN EFECTO		30% CONSUMIDO		70% CONSUMIDO	2,8	100% CONSUMIDO	SUMA	8,3
% FOLLAJE VIVO	SIN EFECTO		70% - 100%		30% - 70%	2,7	0% - 30%	PROMEDIO	2,77
% HIERBA CONSUMIDA	SIN EFECTO		0% - 30%		30% - 70%	2,8	70% - 100%		
C. ARBUSTOS Y ARBOLES DE 1 A 5 METROS									
% FOLLAJE ALTERADO	SIN EFECTO		30% CONSUMIDO		70% CONSUMIDO	2,9	100% CONSUMIDO	SUMA	5,7
% FOLLAJE VIVO	SIN EFECTO		70% - 100%		30% - 70%	2,8	0% - 30%	PROMEDIO	2,85
D. DOSEL, ABOLES INTERMEDIOS Y GRANDES									
% VERDE (INALTERADO)	100%		80%		40%	3	<10%	SUMA	11,4
% NEGRO (ANTORCHA)	NINGUNO		5% - 20%		60%	2,7	>85%		
% MARRON (CHAMUSCADO)	NINGUNO		5% - 20%		40% - 80%	2,8	>80%	PROMEDIO	2,85
% MORTALIDAD DEL DOSEL	NINGUNO		15%		60%	2,9	>60%		
CBI = SUMA DE PUNTAJES / N° DE CALIFICACIONES					(3+2,77+2,85+2,85)/N				
(A+B+C+D)/N°					2,9				

*Ilustración 3.48 Formulario para la determinación de severidad en campo (CBI)*

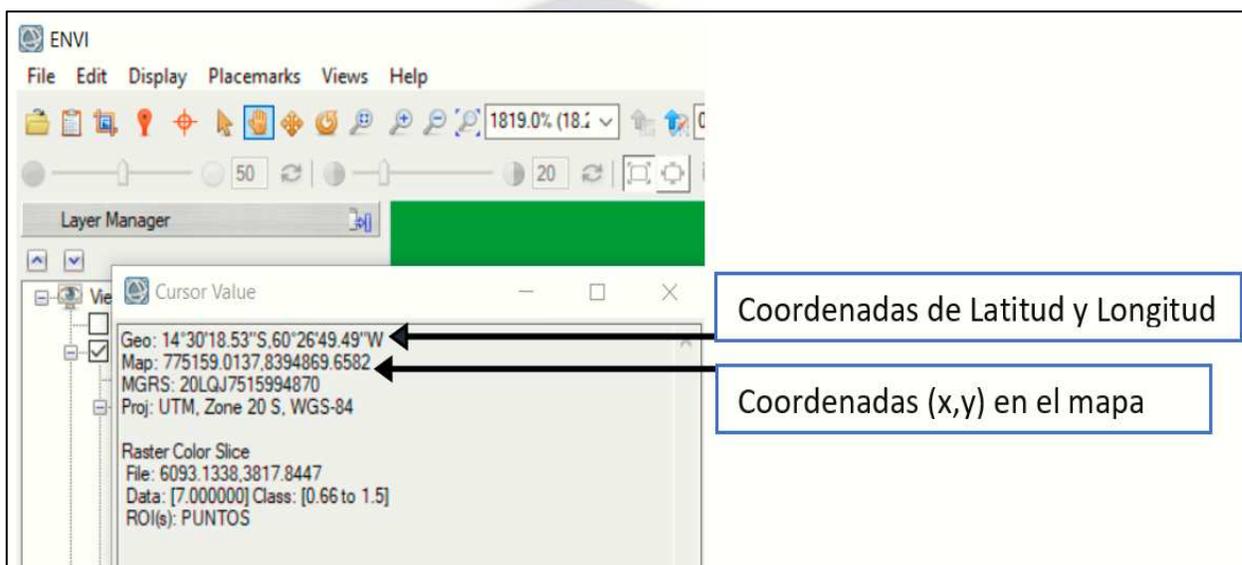
*Fuente: Elaboración propia.*

Como se observa en el anterior formulario nos sirve para tomar los diferentes niveles de severidad según los diferentes aspectos visuales del campo tras el incendio con el fin de determinar la severidad promedio del área de estudio. Es muy importante tomar la latitud y longitud ya que estos puntos deberán ser georreferenciados.

### 3.9.2. Procesamiento de los datos de campo CBI.

Los datos obtenidos en el trabajo de campo se los llevó a un archivo Excel, con el fin de proyectarlos y determinar sus coordenadas  $[x, y]$  de cada punto del mapa.

Inicialmente se usó las coordenadas de latitud y longitud de cada punto, para luego proyectarlos en el Software Envi, se hizo uso de este Software debido a que la herramienta Cursos Value nos otorga con gran facilidad todos los datos de la coordenada ingresada en relación al mapa.



*Ilustración 3.49 Obtención de coordenadas del mapa en el Software Envi.  
Fuente: Elaboración propia.*

Una vez que se obtuvo las coordenadas de todos los puntos en el mapa, estas coordenadas fueron llevadas al Excel creado inicialmente y se los copio en las columnas “MAP\_X” y “MAP\_Y”. El archivo quedo de la siguiente manera:

PUNTO	COORDENADAS	MAP_X	MAP_Y	SEV
1	16ø6'58.80"S,60ø20'3.55"W	785127.2168	8216354.3652	3
2	16ø7'0.46"S,60ø20'5.39"W	785071.8604	8216304.0332	2,7
3	16ø6'52.41"S,60ø20'1.56"W	785189.0332	8216550.0391	2,5
4	16ø6'46.05"S,60ø19'51.66"W	785485.8984	8216741.7871	3
5	16ø6'35.98"S,60ø19'28.57"W	786176.5283	8217042.7832	2,9

*Tabla 3.2 Coordenadas del mapa con severidades obtenidas del trabajo de campo.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Donde:

MAP\_X, es la coordenada “x” en el mapa.

MAP\_Y, es la coordenada “y” en el mapa.

SEV, es la severidad medida en el trabajo de campo

Este archivo fue almacenado como un archivo .csv(MS-DOS), para luego ser leído en por el Software R, y realizar la comparación de los índices.

### **3.10. Análisis de índices para severidad.**

Realizando una investigación de diferentes estudios y papers relacionados con nuestro tema, los cuales se realizaron en diferentes países como: España (Península Ibérica, Galicia), Chile (Región de Maule), Argentina (Buenos Aires) y Estados Unidos (Bear, Jasper, Mule, Wolf, PW03), se observó que en la mayoría de ellos se hace uso del índice NBR el cual es más conocido como DNBR ya que es una modificación al NBR. Así mismo también existen otros índices como el RBR y RDNBR los cuales son derivados del DNBR.

Estos índices RBR y RDNBR son una alternativa al uso del DNBR, y el uso de los mismos dependerá de las características del área de estudio como la topografía, tipo de suelo, altura sobre el nivel del mar y otros factores. Por todo lo mencionado se optó por hacer uso de los índices mencionados con el fin de buscar el índice que más pueda adecuarse a nuestra área de trabajo.

#### **3.10.1. Cálculo del índice Normalized Burn Ratio (NBR).**

Primeramente, se procede al calcular el índice NBR.

$$NBR = \frac{B5 - B7}{B5 + B7}$$

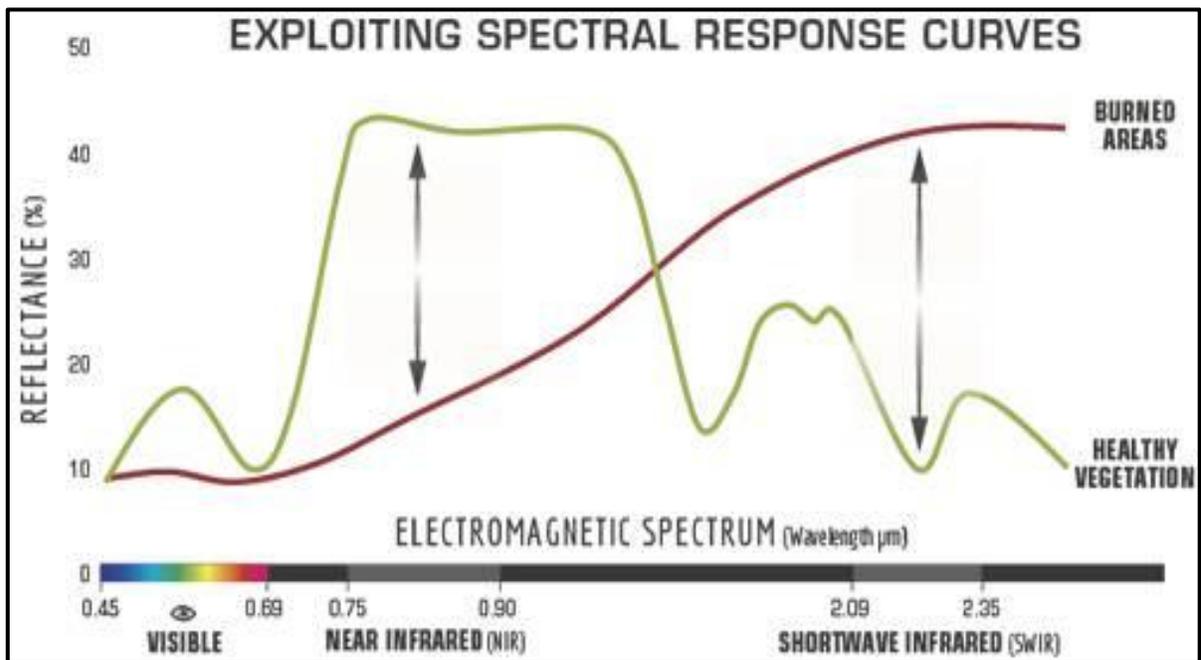
Donde:

NBR → Es el índice de quema normalizado

B5 → Es la reflectancia en la banda 5

B7 → Es la reflectancia en la banda 7

Como se observa en la formula, nuestro índice hará una resta entre las bandas 5 y 7 y lo dividirá entre la suma de las mismas.



*Ilustración 3.50 Firma espectral del suelo quemado con el suelo de vegetación saludable*

*Fuente: Servicio Forestal de EE. UU.*

Si analizamos la figura las mayores separaciones de la firma espectral entre suelo quemado y vegetación sana se encuentran en la longitud de onda 750 nm que pertenece a la banda 5 (NIR) del Landsat8, así también se observa una amplia separación entre 2100 nm y 2300nm que pertenece a la banda 7 (SWIR2), de tal forma que las especies de plantas sanas reflejan más energía en NIR, pero débilmente en SWIR. Esta característica espectral es útil para detectar áreas quemadas.

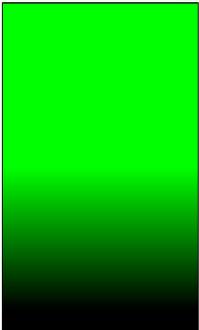
Como todo este procedimiento se realizó en el software R, se hará una explicación del procedimiento por el cual recorrió nuestra imagen hasta obtener un mapa con diferenciación de severidades.

Primeramente, se cargaron los archivos generados en el pre procesamiento los cuales están con los nombres "mosaico\_pre" que pertenece al mapa pre incendio, y de igual manera se cargó el "mosaico\_post" que pertenece al mapa post incendio. Para asegurarnos de que los

archivos se cargaron de manera correcta aplicamos un ploteo en RGB el cual hace uso de las bandas rojo (red=4), verde (green=3) y azul (blue=2).

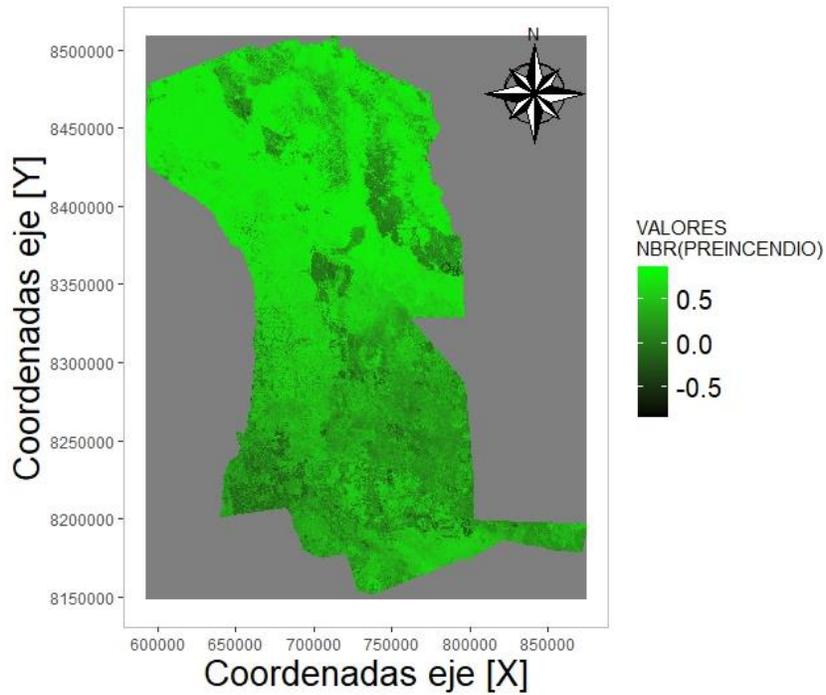
Como siguiente paso se calcula el NBR pre incendio con la formula anteriormente mencionada, por lo cual se hace uso de las bandas 5 y 7, las cuales pertenecen a las bandas del Infrarrojo Cercano (Near Infra Red NIR) e Infrarrojo de Onda Corta (Short Wave Infrared SWIR). Para calcular el NBR post incendio se repite el procedimiento anterior de tal manera que se hará uso de las bandas 5 y 7 pero de la imagen post incendio. Para verificar que se calculó correctamente el NBR pre y NBR post incendio, se observó los valores mínimos y máximos de cada imagen, y nos cercioramos de que estos valores se encuentren entre **-1** y **+1**. Para nuestro caso se verificaron los valores NBR pre incendio como también el NBR post incendio y se verifico que sus valores se encuentren en el rango correcto, por lo cual, se puede continuar con el tratamiento de las imágenes.

A continuación, tenemos imágenes de las áreas antes y después del incendio, asimismo en la siguiente tabla se observa el filtro de color que se utilizó para los niveles de NBR calculados.

	<b>Verde 1</b>	Valores positivos representan zonas de vegetación o en fase de regeneración si previamente ha existido un incendio
	<b>Verde 0</b>	Valores cercanos a cero representa zonas no afectadas o sin quemar
	<b>Negro -1</b>	Valores negativos nos ilustran zonas afectadas por el fuego

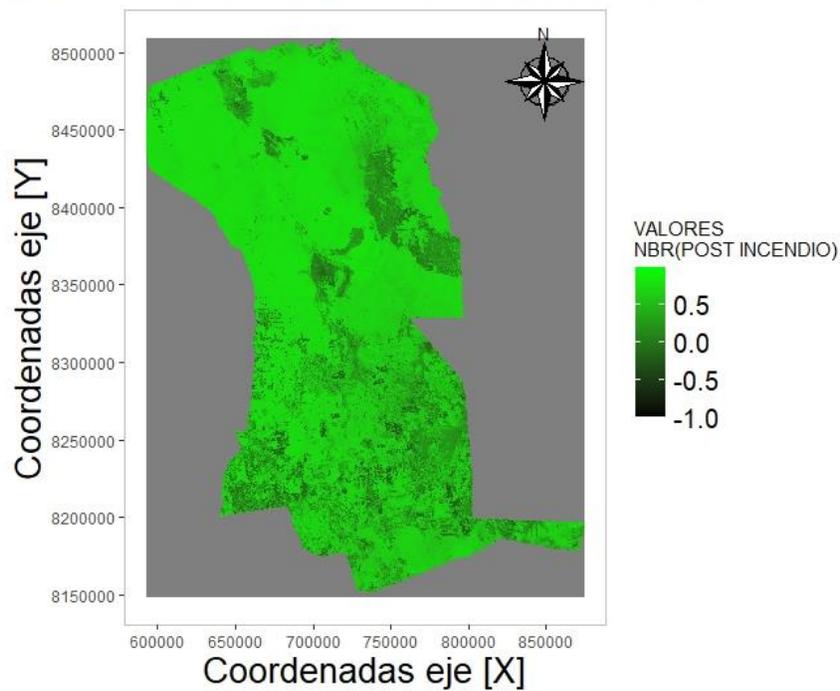
*Tabla 3.3 Valores de severidad para el índice NBR.  
Fuente: Elaboración propia.*

## NBR ANTES DEL INCENDIO



*Ilustración 3.51 Mapa pre incendio tras la aplicación del índice NBR.  
Fuente: Elaboración propia.*

## NBR DESPUES DEL INCENDIO



*Ilustración 3.52 Mapa post incendio tras la aplicación del índice NBR.  
Fuente: Elaboración propia.*

### 3.10.2. Cálculo del índice Difference Normalized Burn Ratio (DNBR).

$$DNBR = NBR_{pre} - NBR_{post}$$

Donde:

DNBR → Es el índice Difference Normalized Burn Ratio

$NBR_{pre}$  → Es el índice NBR calculado antes del incendio

$NBR_{post}$  → Es el índice NBR calculado después del incendio

Como ya se mencionó el índice NBR nos ayuda a determinar las áreas quemadas y no quemadas de un área tras un incendio, sin embargo, este índice presenta la dificultad de no poder diferenciar las diferentes severidades que pueden ser relacionadas con el NBR pre incendio. Por lo cual una alternativa a este índice, es el índice DNBR, ya que el mismo se basa en las características del suelo antes del incendio, y al realizar una diferencia entre el NBR pre incendio y NBR post incendio, podremos clasificar los diferentes grados de severidad que se causaron en el suelo.

La tabla de clasificación de severidades el cual nos ayuda interpretar la gravedad de la quemadura, fue propuesta por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Severity Level	dNBR Range (scaled by 10 <sup>3</sup> )	dNBR Range (not scaled)
Enhanced Regrowth, high (post-fire)	-500 to -251	-0.500 to -0.251
Enhanced Regrowth, low (post-fire)	-250 to -101	-0.250 to -0.101
Unburned	-100 to +99	-0.100 to +0.99
Low Severity	+100 to +269	+0.100 to +0.269
Moderate-low Severity	+270 to +439	+0.270 to +0.439
Moderate-high Severity	+440 to +659	+0.440 to +0.659
High Severity	+660 to +1300	+0.660 to +1.300

*Tabla 3.4 Niveles de severidad en incendios obtenidos a partir del DNBR, propuesto por la USGS.*

*Fuente: Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)*

Para nuestro caso se aplicó el DNBR a las áreas pre y post incendio.

Los valores del DNBR llegan a variar entre -2 y 1.8, los cuales se encuentran en total concordancia con los límites propuestos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Los valores que se encuentran por encima de los límites serán tomados como

severidad alta, y los valores que se encuentran por debajo de los límites serán tomados áreas de alto crecimiento post incendio.

En nuestro mapa se utilizó la siguiente paleta de colores en base a la siguiente tabla.

COLOR	RANGO [DNBR]	NIVEL DE SEVERIDAD
	0.659 a Infinito	Alta severidad
	0.440 a 0.659	Moderada – Alta severidad
	0.270 a 0.439	Baja – Moderada severidad
	0.100 a 0.269	Baja severidad
	-0.100 a 0.099	No quemado
	-0.250 a -0.101	Bajo crecimiento de vegetación posterior al incendio
	-Infinito a -0.251	Alto crecimiento de vegetación posterior al incendio

Tabla 3.5 Rango de severidades aplicados para el índice DNBR.  
Fuente: Elaboración propia.

## MAPA CON INDICE DNBR SAN IGNACIO DE VELASCO

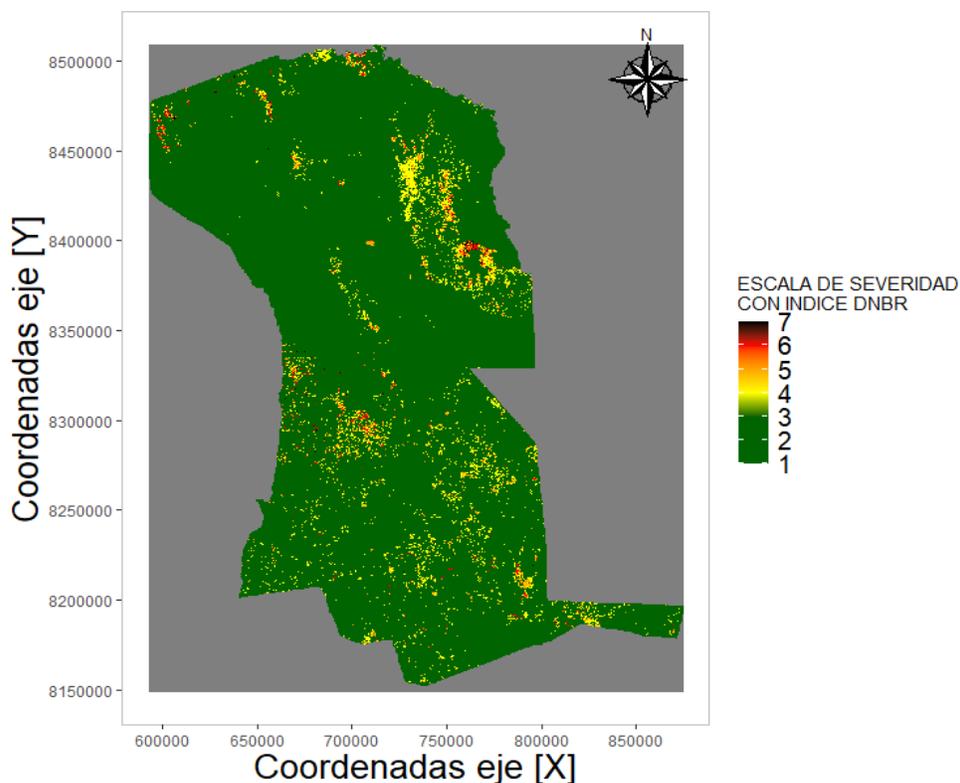


Tabla 3.6 Mapa con clasificación no supervisada para el índice DNBR.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.10.3. Cálculo del índice Relativized Burn Ratio (RBR)

$$RBR = \frac{DNBR * 1000}{NBR_{pre} + 1.001}$$

Donde:

RBR → Es el índice Relativized Burn Ratio

$NBR_{pre}$  → Es el índice NBR calculado antes del incendio

DNBR → Es el índice Difference Normalized Burn Ratio

Según los autores si un área cuya cubierta vegetal pre incendio es baja (es decir, bajo NBR) generalmente tendrán valores bajos de dNBR independientemente del grado de mortalidad de la vegetación inducida por el fuego. Como medida absoluta de cambio, dNBR simplemente no permite la cuantificación de alta severidad en estos casos, incluso si se consume toda la vegetación anterior al incendio. Como resultado, los valores de dNBR a menudo se correlacionan con la NBR previa al incendio. El denominador en la ecuación para RdNBR elimina esta correlación y permite que la métrica sea más sensible que dNBR a los cambios donde la cobertura vegetal antes del incendio es baja. Como tal, un índice relativo como RdNBR es teóricamente más adecuado para detectar cambios en la vegetación en una escala constante. Sin embargo, matemáticamente existen varias dificultades asociadas con el denominador del RdNBR. En primer lugar, la transformación de la raíz cuadrada hace que valores muy pequeños de NBR antes del incendio produzcan valores extremadamente altos o bajos, es decir valores negativos de RdNBR. El significado de tales valores extremos es difícil de interpretar, ya que aparecen como valores atípicos en comparación con la mayoría de los valores de RdNBR y se deben más a valores de NBR previos al incendio muy bajos que a la cantidad de cambio inducido por el fuego. Por lo cual aplicar el índice RBR eliminara los valores atípicos que produce el denominador del RDNBR.

A continuación, observamos los límites de clasificación para el índice aplicado como también la paleta de colores asignada para la visualización de la severidad.

COLOR	RANGO [RBR]	SEVERIDAD
Black	0.32 a Infinito	Severidad alta
Red	0.22 a 0.32	Severidad moderada alta
Orange	0.13 a 0.22	Severidad moderada baja
Yellow	0.07 a 0.13	Severidad baja
Green	-Infinito a 0.07	Área sin quemar

Tabla 3.7 Rango de severidades aplicados para el índice RBR.  
Fuente: Elaboración propia.

## MAPA CON INDICE RBR SAN IGNACIO DE VELASCO

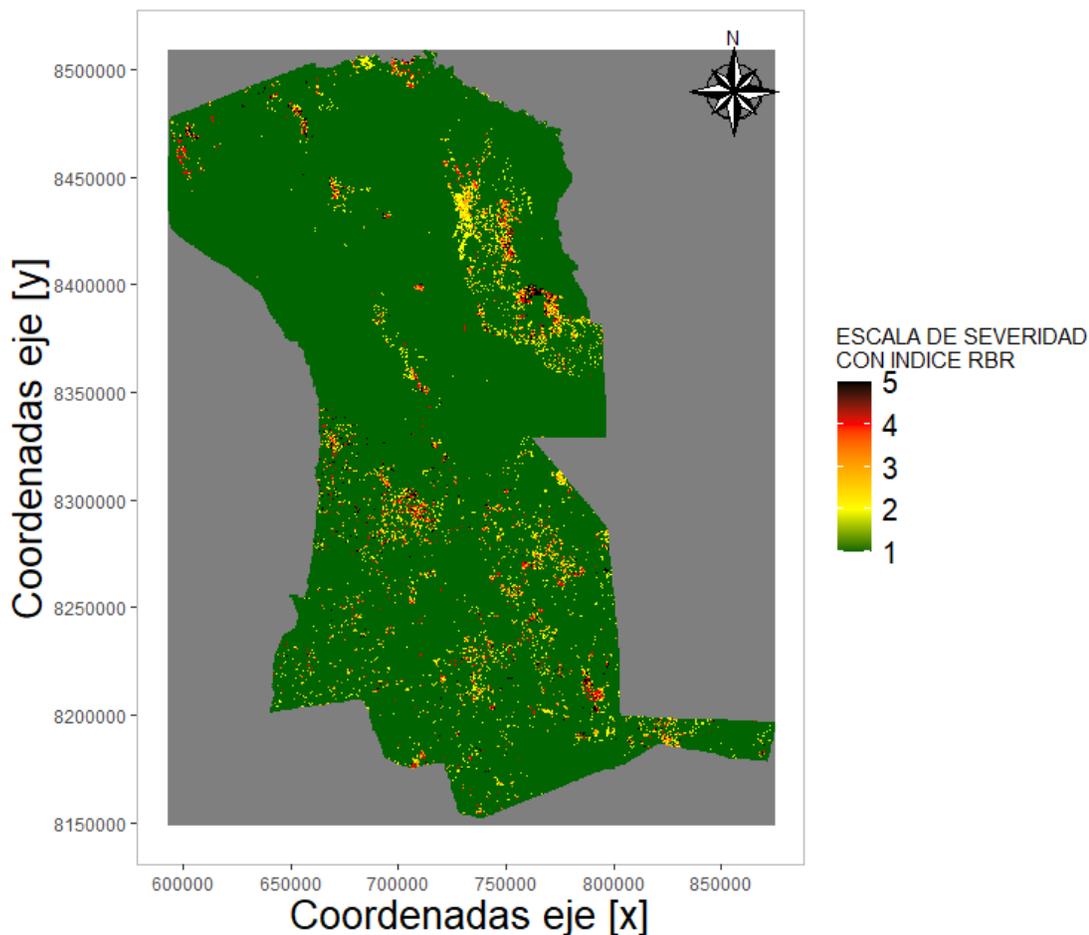


Tabla 3.8 Mapa con clasificación no supervisada para el índice RBR.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.10.4. Cálculo del índice Relative Difference Normalized Burn Ratio (RdNBR).

$$RDNBR = \frac{DNBR * 1000}{\sqrt{|NBR_{pre}|}}$$

Donde:

RDNBR → Es el índice Relativized Difference Normalized Burn Ratio

$NBR_{pre}$  → Es el índice NBR calculado antes del incendio

DNBR → Es el índice Difference Normalized Burn Ratio

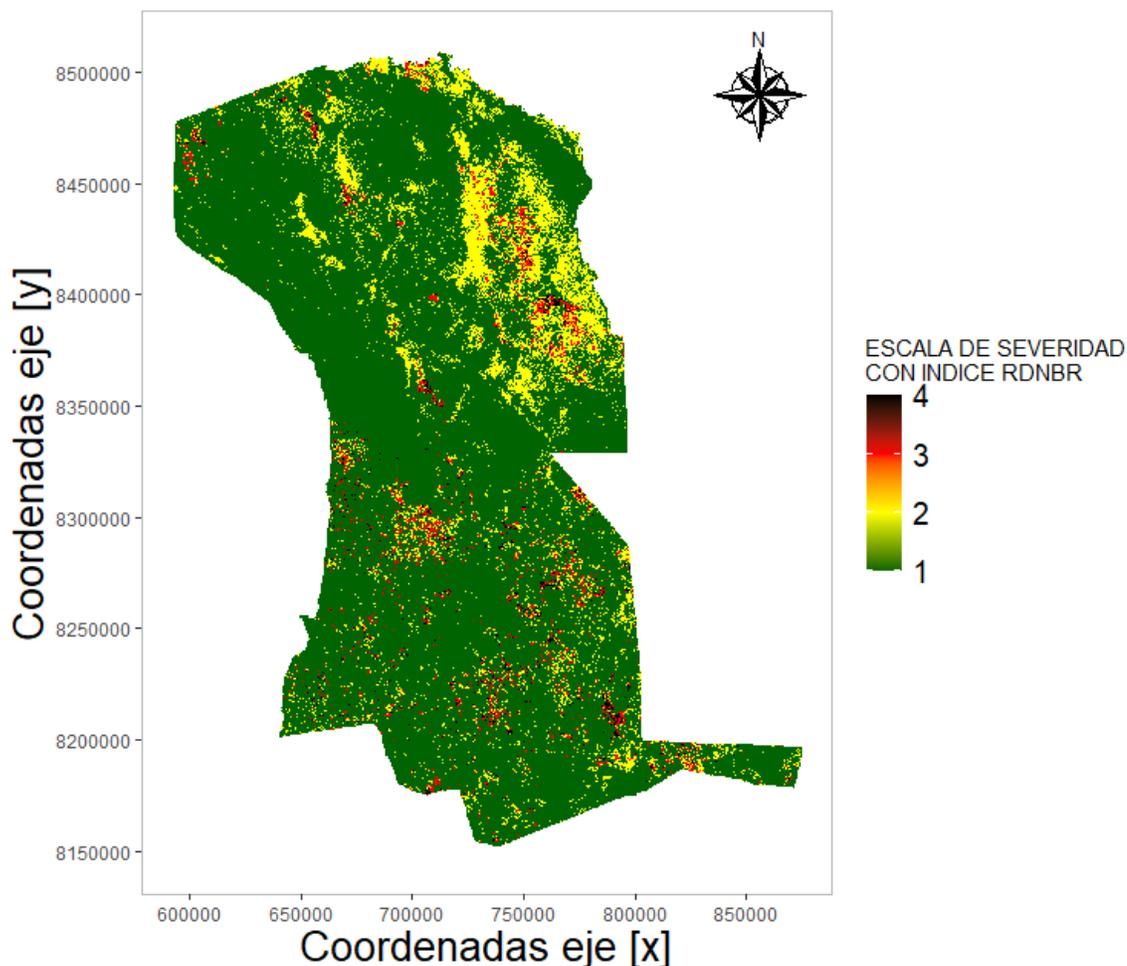
Este índice nace de la siguiente cuestión: Si toda la vegetación en los dos píxeles con pequeñas y grandes cantidades de vegetación antes del incendio experimentan una mortalidad completa de la vegetación viva, es decir, son eliminados por el fuego, ambos píxeles se clasificarían como que han experimentado incendios de alta gravedad. Por lo tanto, el grado de severidad experimentado por la vegetación en cada píxel no depende de la cantidad de vegetación presente antes del incendio, sino del porcentaje de vegetación que se vio afectada, lo que hace que la severidad sea una medida relativa.

En este entendido podemos mencionar que este índice relativo elimina los factores del NBR pre incendio para las áreas de alta severidad. A continuación, observamos los límites de clasificación para el índice aplicado como también la paleta de colores asignada para la visualización de la severidad.

COLOR	RANGO [RDNBR]	SEVERIDAD
	734.7 a Infinito	Severidad alta
	316.7 a 734.7	Severidad moderada
	16.4 a 316.7	Severidad baja
	-Infinito a 16.4	Área sin quemar

*Tabla 3.9 Rango de severidades aplicados para el índice RDNBR.  
Fuente: Elaboración propia.*

# MAPA CON INDICE RDNBR SAN IGNACIO DE VELASCO



*Ilustración 3.53 Mapa con clasificación no supervisada para el índice RDNBR.*

*Fuente: Elaboración propia.*

## **3.11. Comparación de índices de severidad con índice CBI.**

En este punto detallaremos las modificaciones que se realizó en el archivo .csv para que puedan ser interpretadas por el Software R. Así también se detallarla la extracción de datos del mapa con relación a las coordenadas de los puntos de campo.

### **3.11.1. Comparación índice DNBR con índice CBI.**

Una vez cargado el archivo en RStudio se realizaron los siguientes cambios al archivo:

- Se convirtió el archivo al tipo data frame.

- Las columnas de “MAP\_X” y “MAP\_Y” se las convirtió al tipo numérico.
- Se definió a las columnas “MAP\_X” y “MAP\_Y” como coordenadas [x, y] del data frame.
- Se definió como sistema de referencia de coordenadas el mismo sistema que contiene nuestra imagen satelital.
- CRS= +proj=utm +zone=20 +south +datum=WGS84 +units=m +no\_defs
- Se grafico los puntos sobre el mapa para verificar que el proceso se realizó correctamente.

### 3.11.1.1. Extracción de datos del mapa DNBR.

Se cargo el mapa con índice DNBR que se generó anteriormente.

Con el comando “extract” se extrajeron los datos de severidad del mapa, con relación a las coordenadas del data frame, que se generó con las coordenadas del trabajo de campo.

Se unió ambos datos en una nueva variable la cual muestra los datos de **campo** y datos de **mapa**.

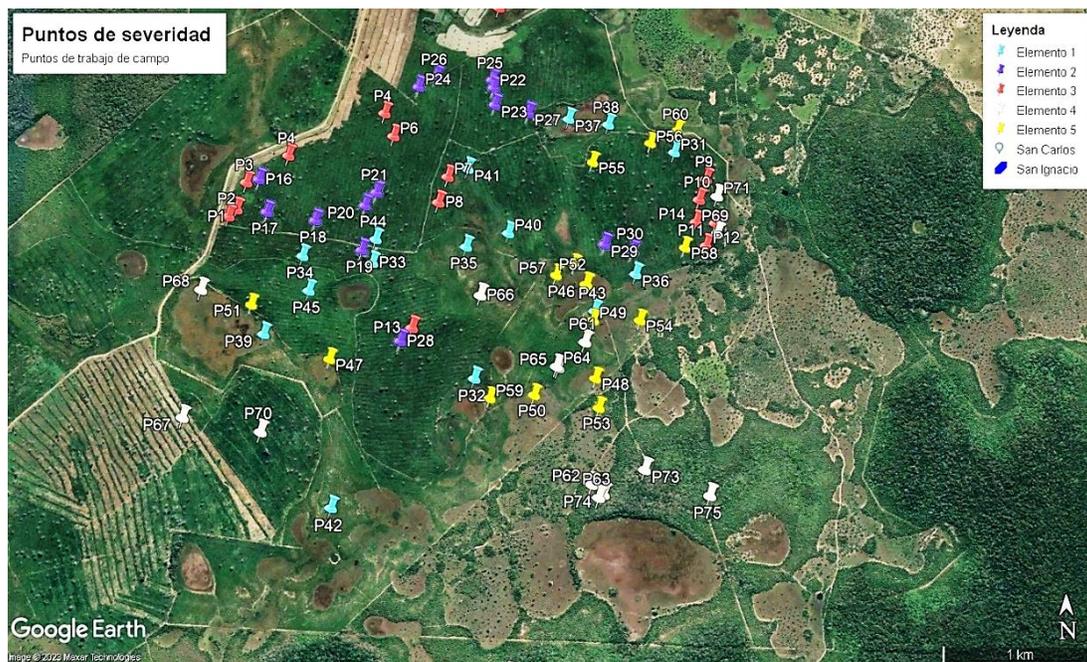
Para los siguientes índices como RDR y RDNBR se realizó el mismo procedimiento anteriormente mencionado.

N°	INDICE [CBI]	INDICE [DNBR]	INDICE [RBR]	INDICE [RDNBR]
1	3	0,686965942	0,5247972	1237,80225
2	2,7	0,681080818	0,53552502	1308,80261
3	2,5	0,708295941	0,51067114	1140,05701
4	3	0,85848099	0,65808547	1558,26794
5	2,9	0,629554152	0,42244083	900,02661
6	2,8	0,626721859	0,44076699	966,03058
7	2,6	0,662836552	0,49031124	1119,01001
8	2,5	0,634578586	0,46293578	1043,56482
9	2,9	0,81535387	0,63471001	1531,03992
10	2,9	0,727454484	0,57474971	1413,96216

*Tabla 3.10 Comparación de índice CBI con índices DNBR, RBR y RDNBR.  
Fuente: Elaboración propia.*

En la anterior tabla de los valores extraídos solo se muestran las primeras 10 columnas, sin embargo se tomo 75 puntos de campo.

En la siguiente imagen se observa los puntos del trabajo de campo proyectados sobre Google Earth.



*Ilustración 3.54 Puntos de campo con proyección en mapa de Google Earth.  
Fuente: Elaboración propia.*

### 3.12. Muestreo y observación de los datos

Una vez que se obtuvieron los datos de severidad para los índices; DNBR, RBR y RDNBR, estos fueron unidos con los datos CBI, y se procedió a dividir las muestras en datos de entrenamiento y datos de testeo.

MUESTRAS DE ENTRENAMIENTO				
N°	INDICE [CBI]	INDICE [DNBR]	INDICE [RBR]	INDICE [RDNR]
5	2,9	0,629554152	0,42244083	900,02661
7	2,6	0,662836552	0,49031124	1119,01001
9	2,9	0,81535387	0,63471001	1531,03992
10	2,9	0,727454484	0,57474971	1413,96216
11	2,8	0,726060987	0,5744139	1415,76965
12	2,7	0,803768158	0,63086271	1538,11084
13	2,9	0,692779243	0,48175213	1047,93384
15	2,9	0,652097642	0,54291636	1457,76501
16	2	0,528325319	0,38774174	878,62811
19	2,3	0,575272441	0,42814848	982,7926
20	2,3	0,492056072	0,37474704	880,87195
21	2,4	0,505994618	0,38536289	905,82617
23	2,2	0,52862817	0,38399443	862,49237
25	2,2	0,554964781	0,39795586	884,65057
26	2,1	0,574529171	0,42466876	968,52325
28	2,2	0,60316056	0,42793792	943,755
31	1,8	0,272375643	0,21607152	534,60345
35	1,3	0,385795414	0,33499342	993,966
39	1,3	0,273759365	0,23747349	702,64111
43	1,6	0,290731162	0,23005453	567,18036
44	1,8	0,433742762	0,35805562	945,64069
45	1,2	0,279359162	0,22386762	562,24158
46	0,7	0,091355778	0,0906441	1103,69324
48	0,4	0,129923746	0,12638164	790,29523
49	0,5	0,224975392	0,1814045	460,00952
51	0,9	0,027820401	0,02649295	125,54421
52	0,8	0,064775765	0,06239967	336,39581
53	0,5	0,092396572	0,08298297	275,5466
54	0,8	0,222325146	0,19906573	653,21179
55	0,7	0,009264201	0,00742813	18,67167
57	0,5	0,246677011	0,21628584	660,41949
58	0,3	0,266837448	0,22474788	618,25842
59	0,6	0,18385455	0,16593979	562,1665
64	0	-0,225084513	-0,20381667	-700,15594
65	0	-0,225084513	-0,20381667	-700,15594
68	0	-0,067175336	-0,06998524	-331,15042
69	0	-0,31127727	-0,26553631	-752,17865
73	0	-0,080047011	-0,05524718	-119,60798
75	0	-0,028775856	-0,02457596	-69,81335

MUESTRAS DE TESTEO				
N°	INDICE [CBI]	INDICE [DNBR]	INDICE [RBR]	INDICE [RDNR]
1	3	0,68696594	0,5247972	1237,8022
2	2,7	0,68108082	0,53552502	1308,8026
3	2,5	0,70829594	0,51067114	1140,057
4	3	0,85848099	0,65808547	1558,2679
6	2,8	0,62672186	0,44076699	966,0306
8	2,5	0,63457859	0,46293578	1043,5648
14	2,8	0,93255806	0,72617286	1752,3544
17	2,1	0,46385765	0,34767723	803,6319
18	2,3	0,54030406	0,39454928	890,1558
22	2,3	0,51080877	0,38143232	878,3763
24	2,2	0,56650573	0,41742858	949,2897
27	2,4	0,45464304	0,34012723	784,7015
29	2,2	0,61383545	0,47695172	1147,8132
30	2,3	0,60396683	0,48206404	1203,425
32	1,2	0,29501817	0,26181635	831,7355
33	1,5	0,30351794	0,24347043	612,41
34	1,2	0,33406869	0,26028731	628,5739
36	1,6	0,36543778	0,34406337	1478,1194
37	1,6	0,32316616	0,30672419	1409,0035
38	1	0,39314514	0,32075664	829,412
40	1,1	0,41650742	0,36343852	1093,7307
41	1,4	0,41552955	0,32548359	791,4449
42	1,6	0,4271239	0,33508712	816,4772
47	0,4	0,08647215	0,07854161	273,4866
50	0,9	0,20379278	0,18266177	601,7799
56	0,7	0,23357165	0,18040511	430,9863
60	0,7	0,07905775	0,06715002	188,27
61	0	-0,22501269	-0,19241996	-548,3495
62	0	-0,22608437	-0,18810073	-504,3657
63	0	-0,24483684	-0,19480258	-484,0469
66	0	-0,09968954	-0,08689112	-260,6384
67	0	-0,05663406	-0,05673131	-1087,0645
70	0	-0,29802105	-0,22054249	-503,5253
71	0	-0,28030384	-0,22651801	-576,4516
72	0	-0,13540202	-0,09980214	-227,0285
74	0	-0,29424816	-0,24439795	-653,125

Tabla 3.11 Muestreo de los datos en muestras de entrenamiento y muestras de testeo.

Fuente: Elaboración propia.

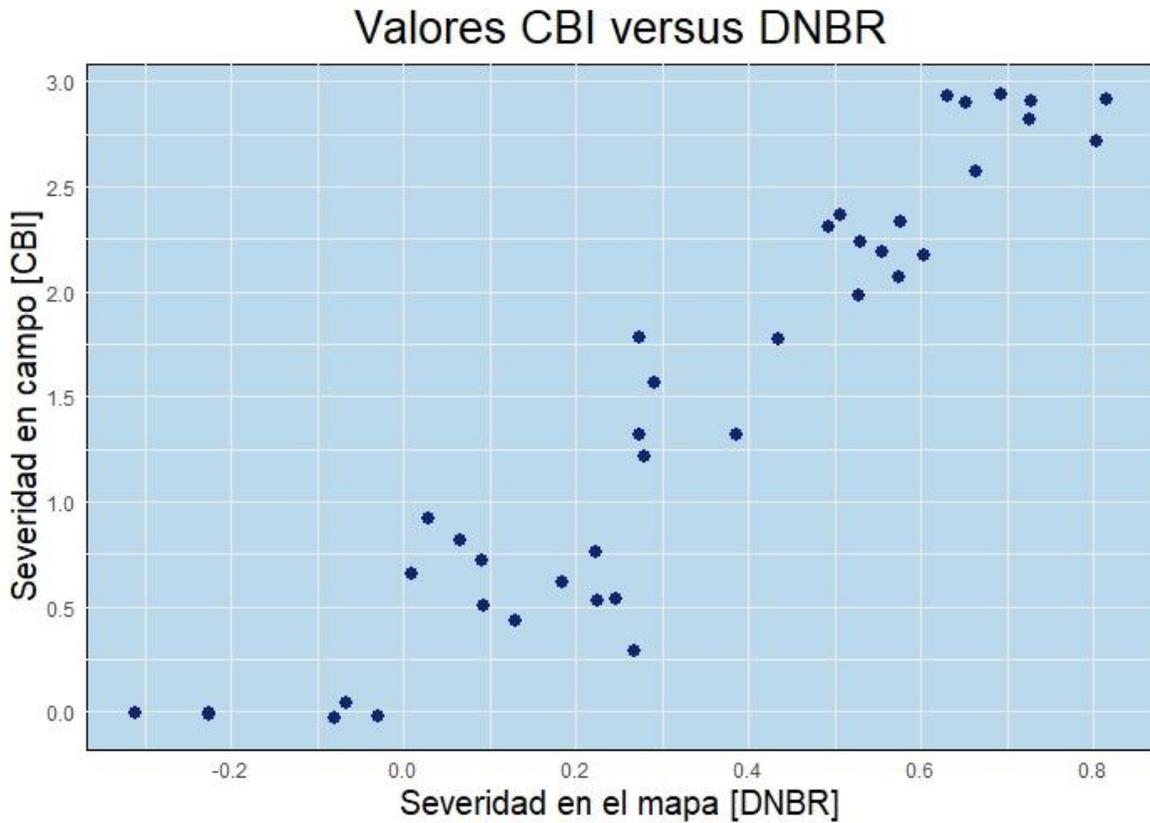
El procedimiento que se realizara es el siguiente:

Se divide las 75 muestras aleatoriamente en la mitad, entonces, 50% de los datos serán utilizados para calcular la mejor regresión, y los restantes 50% serán utilizados como datos de entrenamiento para evaluar el rendimiento de la mejor regresión.

Como siguiente paso se realizaron los gráficos.

- Valores del CBI obtenido en el campo versus los valores DNBR
- Valores CBI versus valores RBR
- Valores CBI versus valores RDNBR.

Esto con el fin de observar el comportamiento de los datos en campo para así definir los tipos de regresiones a ser utilizados.



*Tabla 3.12 Valores de severidad CBI versus valores DNBR.  
Fuente: Elaboración propia.*

### Valores CBI versus RBR

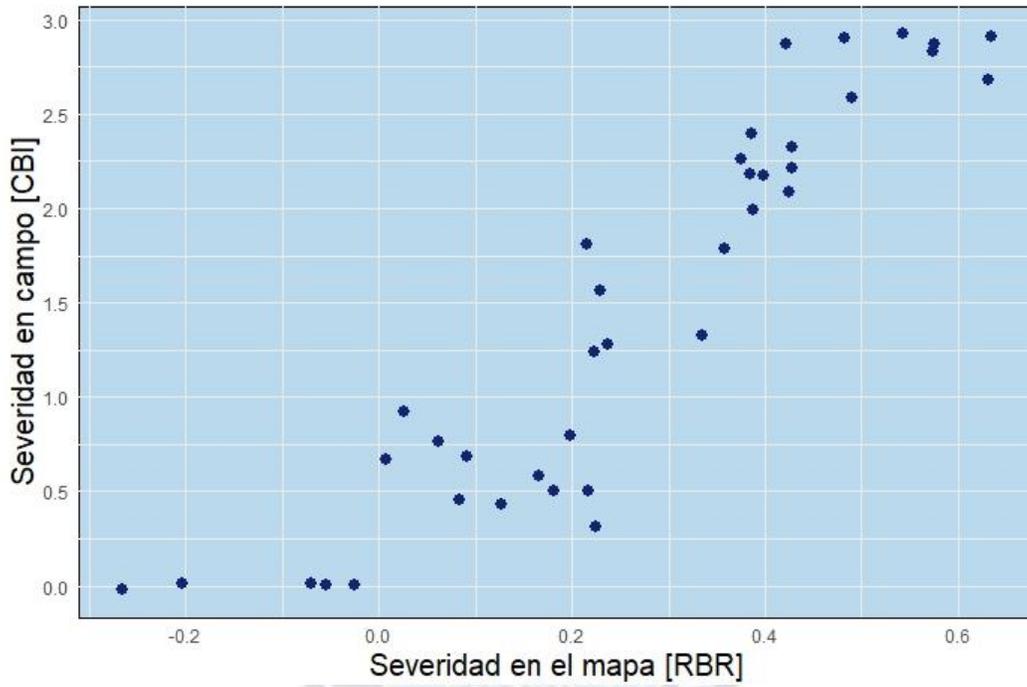


Tabla 3.13 Valores de severidad CBI versus valores RBR.  
Fuente: Elaboración propia.

### Valores CBI versus RDNBR

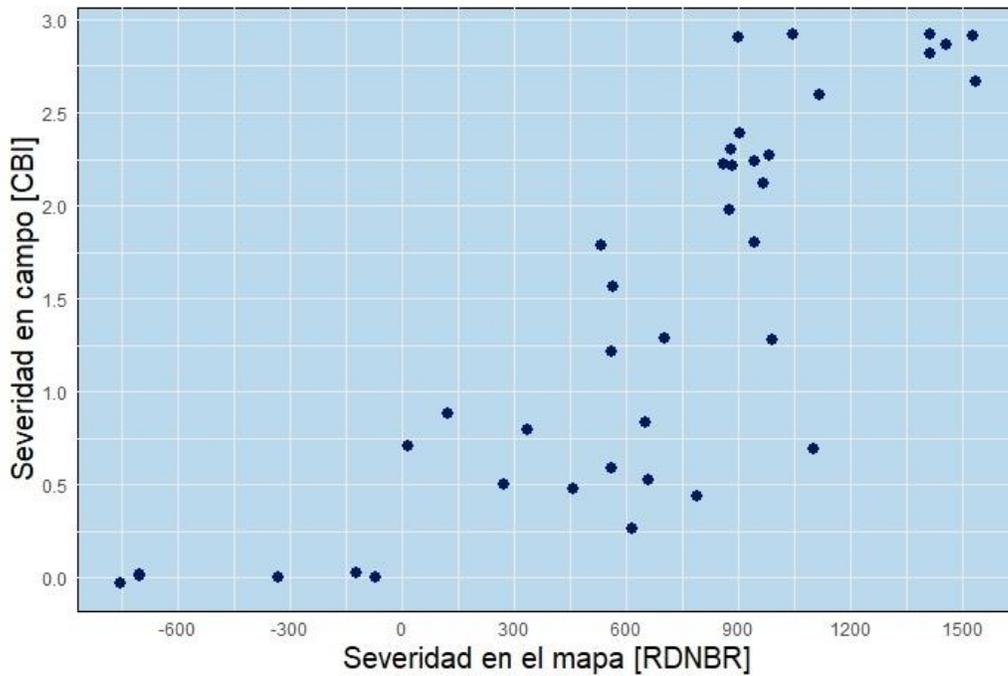


Tabla 3.14 Valores de severidad CBI versus valores RDNBR.  
Fuente: Elaboración propia.

Analizando los anteriores gráficos, se puede observar que los puntos tienden a seguir el mismo patrón que el de una función lineal, pero también el mismo puede representarse como una función cuadrática o incluso cúbica. Por lo cual se hará la aplicación de las funciones mencionadas. También se hará la aplicación de una función exponencial y logarítmica ya que suelen existir casos en que el observador no es capaz de visualizar este tipo de funciones, sin embargo, no está demás realizar la regresión y observar la tendencia de los datos.

### **3.13. Aplicación de diferentes regresiones y análisis de parámetros estadísticos.**

El software R tiene tanta robustez que nos permite realizar todo tipo de análisis estadísticos como también visualizar sus resultados, en caso de considerar realizar estos análisis de manera manual serían muy demorosos y no presentarían precisión ni exactitud, en ese entendido realizaremos la construcción de los modelos de regresión ya mencionados y posteriormente se evaluará cada uno de ellos.

Para la evaluación del mejor modelo se realizará una comparación de diferentes indicadores estadísticos como:

- R cuadrado
- R cuadrado ajustado
- P valúe
- Criterio de información de Akaike AIC

Si bien el R cuadrado es un parámetro importante a la hora de evaluar modelos, el mismo tiene la desventaja de aumentar a medida que se aumenta la cantidad de variables de entrada o el grado del polinomio, por lo cual primordialmente nos basaremos en el criterio de información de Akaike, ya que esta medida de calidad penaliza los modelos complejos en favor de los modelos sencillos, es decir, los modelos con mayor complejidad tendrán un valor más alto de Akaike, y los modelos con menor complejidad tendrán valores mínimos de Akaike.

Para la selección del mejor modelo usaremos los criterios aproximados de Burham & Anderson (2002), donde establecen rangos o consideraciones para los valores de los Akaiken en diferentes modelos.

$1 < \Delta AIC < 2$  Para modelos que presentan este diferencial de AIC, los modelos tienen soporte empírico y pueden ser considerados al momento de hacer inferencias.

$4 < \Delta AIC < 7$  Para modelos que presentan este diferencial AIC, los modelos tienen considerablemente menos soporte empírico.

$\Delta AIC > 10$  Para modelos que presentan este diferencial AIC, no presentan soporte empírico y podrían ser omitidos a la hora de realizar inferencia.

### 3.13.1. Aplicación de regresiones a las muestras de entrenamiento.

Se aplicarán las funciones:

- Lineal
- Cuadrática
- Cubica
- Logarítmica
- Exponencial

#### 3.13.1.1. Aplicación de regresiones al índice DNBR.

En la siguiente tabla se observan los resultados tras la aplicación de diferentes modelos de regresión a las muestras de entrenamiento respecto al índice DNBR.

RESULTADOS DE REGRESIONES PARA INDICE DNBR							
N°	ECUACION	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> AJUSTADO	P-VALUE	AIC	MODELO	ΔAIC
1	$y = 0.25701 + 2.33495 * x + 4.51893 * x^2 - 4.00174 * x^3$	91,61%	90,89%	6,84E-19	26,0882	R.Cubica	0
2	$y = 0.38612 + 2.38674 * x + 1,40889$	90,37%	89,84%	5,06E-19	29,43764	R.Cuadratica	3,34944
3	$y = 0,40065 + 3,19639 * x$	88,77%	88,46%	3,76E-19	33,45337	R.Lineal	7,36517
4	$y = 2,4033 + 0,5602 * Ln(x)$	70,20%	69,40%	2,88E-11	71,49473	R.Logaritmica	45,40653
5	$y = e^{(-2,1336+5,2727 * x)}$	71,25%	70,48%	1,47E-11	117,70466	R.Exponencial	91,61646

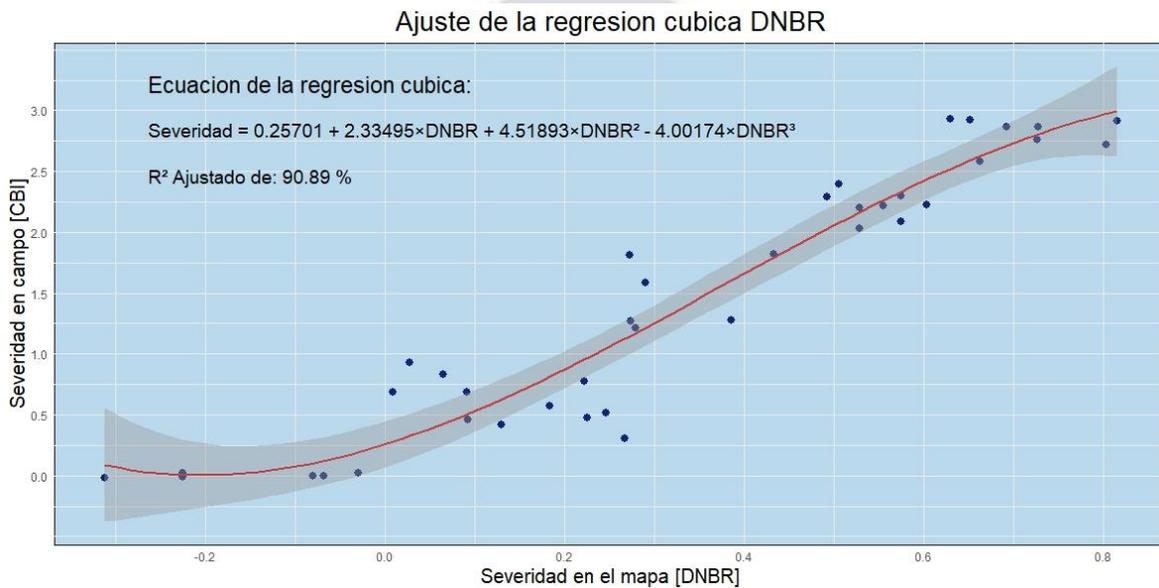
*Tabla 3.15 Comparación de diferentes regresiones para el índice DNBR.  
Fuente: Elaboración propia.*

De la tabla anterior se puede observar que el mejor  $\Delta AIC$  y mejor  $R^2$  lo tiene la expresión que fue generada bajo la regresión cubica.

Por lo tanto, el mejor modelo para la predicción de severidad en el caso del índice DNBR estará dado por:

$$Severidad = 0.25701 + 2.33495 * DNBR + 4.51893 * DNBR^2 - 4.00174 * DNBR^3$$

A continuación, se observa el ajuste que presenta la función cubica respecto a los puntos de entrenamiento.



*Ilustración 3.55 Ajuste de la mejor regresión DNBR con las muestras de entrenamiento.*

*Fuente: Elaboración propia.*

De los resultados obtenidos también se puede resaltar:

Las constantes encontradas por la regresión son significantes debido a que sus valores son altos, como también los valores mínimos del p-value hallados, ratifican el estado de las constantes e indican que los mismos son de gran significancia y con amplio intervalo de confianza para los valores predichos.

Como se trabaja al 95% de confianza, nuestro p-value debería ser menor al 0.05 para considerar el modelo como valido, observando nuestra tabla donde se muestra un p-value de  $6.84 * 10^{-19}$  se puede exponer que el modelo es válido.

Observando el  $R^2$  ajustado deducimos que el 90.89 % de variabilidad de la variable *Severidad* es correctamente explicado por la variable *DNBR*.

Con un error estándar residual de 0.3139 podemos mencionar que existe poca variabilidad de los residuos en la regresión, lo cual nos indica poca incertidumbre y mayor certeza de los valores *Severidad* calculados.

Por todas las características de sus resultados mencionados, el modelo cubico es considerado como el modelo de mejores parámetros e indicadores estadísticos para en caso del índice DNBR.

### 3.13.1.2. Aplicación de regresión al índice RBR.

RESULTADOS DE REGRESIONES PARA INDICE RBR							
Nº	ECUACION	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> AJUSTADO	P-VALUE	AIC	MODELO	ΔAIC
1	$y = 0.1961 + 3.1013 * x + 8.4698 * x^2 - 10.0802 * x^3$	89,5%	88,6%	3,26E-17	34,7	R.cubica	0
2	$y = 0.38949 + 3.01600 * x + 2.52886 * x^2$	87,3%	86,6%	6,91E-17	40,1	R.cuadratica	5,37
3	$y = 0.42225 + 4.06541 * x$	85,1%	84,7%	7,01E-17	44,4	R.lineal	9,71
4	$y = 2.55349 + 0.58624 * \ln(x)$	67,7%	66,8%	1,30E-10	74,6	R.logaritmica	39,9
5	$y = e^{(-2.1612+6.9597 * x)}$	73,6%	72,9%	3,04E-12	114	R.exponencial	79,7

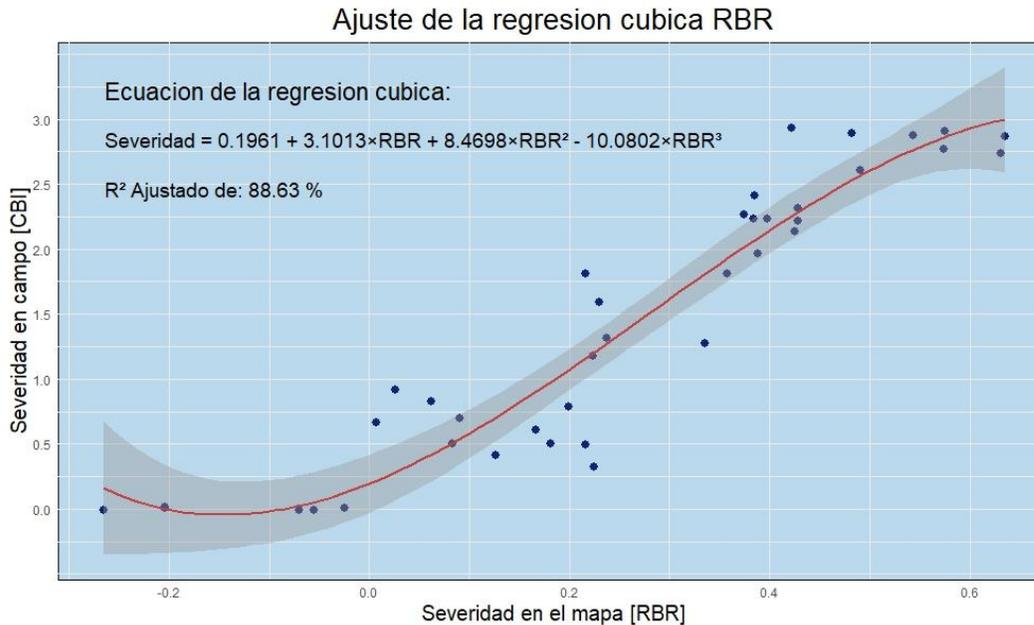
*Tabla 3.16 Comparación de diferentes regresiones para el índice RBR.  
Fuente: Elaboración propia.*

De la tabla anterior se puede observar que el mejor  $\Delta AIC$  y mejor  $R^2$  lo tiene la expresión que fue generada bajo la regresión cubica.

El mejor modelo se predicción de severidad para el caso del índice DNBR estará dada por la ecuación:

$$Severidad = 0.1961 + 3.1013 * RBR + 8.4698 * RBR^2 - 10.0802 * RBR^3$$

A continuación, se observa el ajuste que presenta la función cubica generada por el índice RBR, con relación a los puntos de entrenamiento.



*Ilustración 3.56 Ajuste de la mejor regresión RBR con las muestras de entrenamiento*

*Fuente: Elaboración propia.*

De los resultados obtenidos también se puede resaltar que:

Las constantes encontradas por la regresión son de alta significancia, debido a que sus valores son altos. Así también los valores mínimos del p-value indican que se tienen resultados con amplio intervalo de confianza para los valores predichos.

Como se trabaja al 95% de confianza, nuestro p-value debería ser menor al 0.05 para considerar el modelo como valido, observando nuestra tabla donde se muestra un p-value de  $3.26 \times 10^{-17}$  se puede considerar al modelo como valido y con amplio intervalo de confianza.

Observando el  $R^2$  ajustado deducimos que el 88.6 % de variabilidad de la variable *Severidad* es correctamente explicado por la variable *RBR*.

Con un error estándar residual de 0.3507 podemos mencionar que existe poca variabilidad de los residuos en la regresión, lo cual nos indica poca incertidumbre y mayor certeza de los valores *Severidad* calculados para el índice RBR.

Por todas las características de sus resultados mencionados, el modelo cubico es considerado como el modelo de mejores parámetros e indicadores estadísticos para en caso del índice RBR.

### 3.13.1.3. Aplicación de regresión al índice RDNBR.

RESULTADOS DE REGRESIONES PARA INDICE RDNBR							
N°	ECUACION	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> AJUSTADO	P-VALUE	AIC	MODELO	ΔAIC
1	$y = 0.4061 + 0.001060 * x + 4.642 * 10^{-7} * x^2$	71,8%	70,3%	1,24E-10	71,3	R.cuadratica	0
2	$y = 0.2152 + 0,001208 * x + 1.023 * 10^{-6} * x^2 - 4.253 * 10^{-10} * x^3$	73,0%	70,6%	4,76E-10	71,7	R.cubica	0,414
3	$y = 0.5137642 + 0.0014403 * x$	68,2%	67,3%	1,00E-10	74,1	R.lineal	2,8
4	$y = 0.62468 + 0.16816 * Ln(x)$	44,9%	43,4%	3,06E- 6	95,5	R.logaritmica	24,2
5	$y = e^{(-2.222606+0.002806 * x)}$	76,3%	75,7%	3,93E-13	110	R.exponencial	38,9

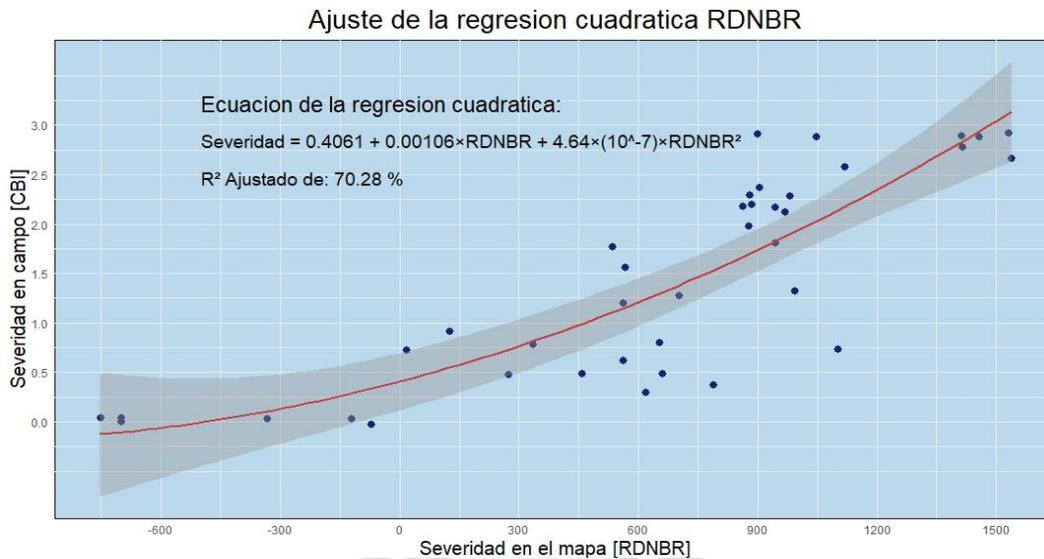
*Tabla 3.17 Comparación de diferentes regresiones para el índice RDNBR.  
Fuente: Elaboración propia.*

De la tabla anterior se puede observar que el mejor  $\Delta AIC$  y mejor  $R^2$  lo tiene la expresión que fue generada bajo la regresión cuadrática.

El mejor modelo de predicción de severidad para el caso del índice RDNBR estará dado por la ecuación:

$$Severidad = 0.4061 + 0.001060 * RDNBR + 4.642 * 10^{-7} * RDNBR^2$$

A continuación, se observa el ajuste que presenta la función cuadrática generada por el índice RDNBR, con relación a los puntos de entrenamiento.



*Ilustración 3.57 Ajuste de la mejor regresión RDNBR con las muestras de entrenamiento.*

*Fuente: Elaboración propia.*

De los resultados obtenidos se puede resaltar:

Los valores mínimos de las constantes generadas por la regresión cuadrática reducen el nivel de confianza para nuestro modelo. Si bien se tiene un valor mínimo de p-value, este valor solo indica la capacidad del modelo para predecir resultados sin embargo haciendo un análisis en el R cuadrado se observa que estas predicciones tienen bajo intervalo de confianza con relación a los modelos anteriormente presentados.

Observando el  $R^2$  ajustado deducimos que solo el 70.28 % de variabilidad de la variable *Severidad* es correctamente explicado por la variable *RDNBR*.

Con un error estándar residual de 0.5669 podemos mencionar que este valor es muy alto como error en la predicción de la severidad, ya que el valor del CBI predicho varía entre 0 y 3, por lo cual tener un error de este grado generaría mucha incertidumbre entre las diferentes severidades, es decir un aumento o reducción de 0.5669 en cualquier pixel generaría un cambio el nivel de severidad.

Por todas las características de sus resultados mencionados, el modelo cuadrático no es considerado como un modelo adecuado para la predicción de la severidad, sin embargo, es la mejor regresión y de mejores características para el índice RDNBR.

### 3.14. Comparación de las mejores regresiones y selección del mejor modelo.

RESULTADOS DE MEJORES REGRESIONES DE CADA INDICE								
N°	ECUACION	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> AJUSTADO	P-VALUE	AIC	ΔAIC	MODELO	INDICE
1	$y = 0.25701 + 2.33495 * x + 4.51893 * x^2 - 4.00174 * x^3$	91,61%	90,89%	6,84E-19	26,0882	0	R.Cubica	DNBR
2	$y = 0.1961 + 3.1013 * x + 8.4698 * x^2 - 10.0802 * x^3$	89,5%	88,6%	3,26E-17	34,7	8,6118	R.cubica	RBR
3	$y = 0.4061 + 0.001060 * x + 4.642 * 10^{-7} * x^2$	71,8%	70,3%	1,24E-10	71,3	45,2118	R.cuadratica	RDNBR

*Tabla 3.18 Comparación de las mejores regresiones de los índices aplicados.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Observando los resultados de las mejores regresiones para los diferentes índices, se observa que los mejores resultados están dados por la regresión cubica generada a través del índice DNBR ya que el mismo presenta:

- Un R cuadrado de 91.61%, si bien este valor solo mide lo bien que el modelo de regresión se ajusta a los datos predichos, también será necesario calcular la magnitud del R respecto a los valores de testeo.
- El valor R cuadrado ajustado de 90.89%, reafirma que realmente la variable DNBR es de gran significancia para el modelo, y que cada uno de los diferentes grados del polinomio son indispensables para la predicción.
- Como se obtuvo un p-value de  $6.84 * 10^{-19}$ , este resultado corrobora la solidez del modelo para la determinación de la severidad. Así también muestra que cada uno de los coeficientes determinados son de gran importancia.
- Para el criterio de evaluación de Akaike el modelo obtuvo un valor de 26.088, demostrando que, a pesar de la complejidad del modelo, la regresión cubica es la mejor catalogada para la medición de la severidad bajo el índice DNBR.
- Respecto al valor del  $\Delta AIC$  el mismo difiere en 8.6118 unidades respecto al AIC del segundo modelo, y tomando en cuenta que el  $\Delta AIC$  no debe diferir en más de 2 unidades para que el segundo modelo también sea considerado como un buen modelo, por lo cual el segundo modelo no puede ser considerado un modelo correcto, por

consiguiente, la regresión cubica para el índice DNBR ratifica ser el modelo con mejores parámetros estadísticos.

Finalmente se opta por elegir al modelo de regresión cubica con índice DNBR como mejor modelo para determinar la severidad en el Municipio de San Ignacio de Velasco.

Ecuación del modelo:

$$\text{Severidad} = 0.25701 + 2.33495 * DNBR + 4.51893 * DNBR^2 - 4.00174 * DNBR^3$$

### 3.15. Aplicación de las muestras de testeo sobre el modelo seleccionado.

Como ya se definió al modelo de regresión cubica DNBR como el modelo más adecuado para la evaluación de la severidad, se realizará otra prueba con el fin de tener una validación del modelo.

Para evaluar la calidad del modelo en la predicción de nuevas severidades se empleará los siguientes parámetros:

R cuadrado, este parámetro nos permitirá conocer que tan bien funciona nuestro modelo con los nuevos datos, si bien al momento de realizar la regresión se tuvo buenos resultados, en este caso podría no presentar la misma eficacia, debido a que los nuevos datos podrían no estar tan bien correlacionados con el modelo.

RMSE, el error cuadrático medio tiene la capacidad de medir el error existente entre dos conjuntos de datos para nuestro caso se medirá el error entre los valores predichos por el modelo y los valores observados en campo.

Para evaluar los datos de testeo con el modelo en el Software R utilizamos el siguiente comando:

```
predicciones = regresion % > % predict(test_dat)
```

Donde:

*regresion*: es el modelo que ya se generó anteriormente

*predict*: es una función del Software

*test\_dat*: son los datos de testeo

Los resultados se encontrarán en nuestra variable “*predicciones*”

Luego convertimos a data frame nuestras predicciones.

Se unió el data frame “predicciones” con los datos de testeo para realizar la comparación y evaluación del modelo.

En la siguiente tabla se puede apreciar los valores predichos por el modelo con los valores de CBI medido en campo.

N° DE MUESTRA	VALOR PREDICHO	VALOR CBI EN CAMPO	N° DE MUESTRA	VALOR PREDICHO	VALOR CBI EN CAMPO
1	2,696353428	3	37	1,348534644	1,6
2	2,679286928	2,7	38	1,630343083	1
3	2,756009009	2,5	40	1,724392807	1,1
4	3,060131223	3	41	1,720464576	1,4
6	2,510306637	2,8	42	1,766976434	1,6
8	2,535918915	2,5	47	0,49018642	0,4
14	3,119052961	2,8	50	0,886730218	0,9
17	1,913078012	2,1	56	0,997995246	0,7
18	2,206671387	2,3	60	0,467938145	0,7
22	2,09553194	2,3	61	0,006067958	0
24	2,302548207	2,2	62	0,006404739	0
27	1,876648205	2,4	63	0,015013034	0
29	2,467500158	2,2	66	0,073178685	0
30	2,434075474	2,3	67	0,140058497	0
32	1,236484743	1,2	70	0,068488817	0
33	1,270181436	1,5	71	0,045764963	0
34	1,392236322	1,2	72	0,033700729	0
36	1,518541689	1,6	74	0,063228319	0

*Tabla 3.19 Comparación de valores predichos con valores en campo generados por la regresión cubica DNBR.  
Fuente: Elaboración propia.*

### 3.16. Verificación de parámetros y validación del modelo.

Los resultados para el  $RMSE$  y  $R^2$  son:

$$RMSE = 0.24$$

$$R^2 = 0.948$$

Un valor de  $RMSE$  de 0.24 nos indica que el modelo presenta poco error para la predicción de nuevas severidades respecto a los datos de campo.

Para el nuevo  $R$  cuadrado de vio un aumento significativo en su valor, esto debido a que los datos de testeo presentaron mejor ajuste que los datos de entrenamiento. Por lo cual el 94.81

% de variabilidad de la variable *Severidad* será correctamente explicado por la variable *DNBR*.

Con todos los resultados observados e interpretados se verifica que el mejor modelo de regresión cubica con índice DNBR es capaz de evaluar la severidad del Municipio de San Ignacio de Velasco.

Modelo para la determinación de la severidad.

$$Severidad = 0.25701 + 2.33495 * DNBR + 4.51893 * DNBR^2 - 4.00174 * DNBR^3$$



## CAPÍTULO 4

### 4. APLICACIÓN DEL MODELO Y RESULTADOS.

#### 4.1. Obtención del mapa de severidad.

Tras la Obtención del modelo, el mismo será aplicado a nuestro mapa del Municipio de San Ignacio de Velasco el cual presenta valores en DNBR.

Modelo de regresión:

$$\text{Severidad} = 0.25701 + 2.33495 * DNBR + 4.51893 * DNBR^2 - 4.00174 * DNBR^3$$

Se realizará el siguiente procedimiento para la aplicación del modelo a nuestro mapa:

1. Cargamos el archivo al cual se aplicó el índice DNBR.
2. Definimos las constantes halladas por el modelo.

$$\text{intercepto} = 0.25701$$

$$\text{dnbr1} = 2.33495$$

$$\text{dnbr2} = 4.51893$$

$$\text{dnbr3} = -4.00174$$

Escribimos la ecuación en el programa.

$$DNBR\_C = \text{intercepto} + \text{dnbr1} * \text{dnbr} + \text{dnbr2} * (\text{dnbr}^2) + \text{dnbr3} * (\text{dnbr}^3)$$

Donde:

*intercepto*: es el valor del corte en el eje “y”, realizado por la curva del modelo.

*dnbr1*: es la constante para la variable lineal *dnbr*

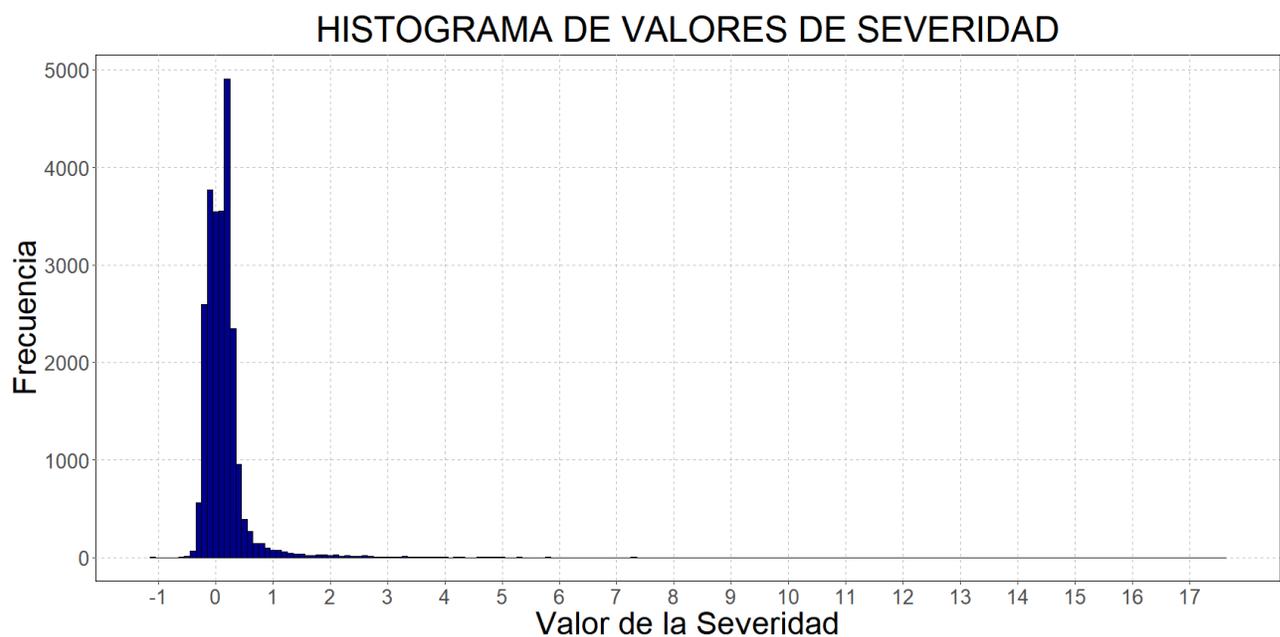
*dnbr2*: es la constante para la variable cuadrática (*dnbr*<sup>2</sup>)

*dnbr3*: es la constante para la variable cubica (*dnbr*<sup>3</sup>)

*dnbr*: es la severidad obtenida mediante el índice DNBR

3. Aplicamos el modelo a la totalidad del mapa, posterior a este paso se obtendrá un nuevo mapa con los niveles calculados por el modelo.

4. Observamos el rango de valores de nuestro nuevo mapa, en el cual se aprecia un mínimo y máximo de: -18.35109 y 44.82367 respectivamente, tras la aplicación de un histograma observamos que estos valores incongruentes son mínimos, por lo cual no tendrán significancia frente a los millones de pixeles que contiene la imagen.



Elaborado por Univ. Alex Salcedo Ticona

*Ilustración 4.1 Histograma de la frecuencia de valores DNBR.  
Fuente: Elaboración propia.*

En el histograma de los valores de severidad se observa que la mayoría de los resultados se encuentran dentro del rango correcto de -1 a 3.

5. Para la clasificación por niveles de severidad se hizo uso de los siguientes rangos, el cual fue utilizado para un estudio en la Amazonia Boliviana por la Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano (FCBC). Mencionar que hacer uso de estos rangos de severidad serán de gran fiabilidad para nuestro resultado final, porque las áreas estudiadas en el presente proyecto presentan una similar topografía con las áreas estudiadas por la Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano (FCBC).

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

Tabla 4.1 Niveles de severidad para el índice CBI.

Fuente: Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano

Recuperado de:

[https://www.fcbc.org.bo/wpcontent/uploads/2021/07/2021\\_MetodologiaRegeneracionBSCh-1.pdf](https://www.fcbc.org.bo/wpcontent/uploads/2021/07/2021_MetodologiaRegeneracionBSCh-1.pdf)

Se definieron las diferentes clases con la siguiente paleta de colores:

COLOR	RANGO [CBI]	SEVERIDAD
	2.25 a Infinito	Severidad alta
	1.25 a 2.25	Severidad moderada
	0.25 a 1.25	Severidad baja
	-Infinito a 0.25	Área sin quemar

Tabla 4.2 Valor del índice CBI para cada tipo de severidad.

Fuente: Elaboración propia.

Se aplicó la reclasificación del mapa con el siguiente comando:

```
clasificacion_dnbr = reclassify(DNBR_C, mat)
```

Donde:

***DNBR\_C*** . - Es un mapa del tipo ráster al cual se aplicó el índice DNBR.

***clasificacion\_dnbr*** . - Es el nuevo mapa del tipo ráster con las diferentes clases de severidad

***mat*** . - Es una matriz de 4\*3 donde las primeras dos columnas representan los rangos de severidad y la tercera columna representa la clase a la cual será asignada.

2.25	Inf	4
1.25	2.25	3
0.25	1.25	2
-Inf	0.25	1

Tabla 4.3 Matriz de clasificación utilizado en el programa.  
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se realiza el ploteo del ráster con la paleta de colores ya definida y se obtiene el mapa con diferentes niveles de severidad con el índice CBI ajustado por el índice DNBR.

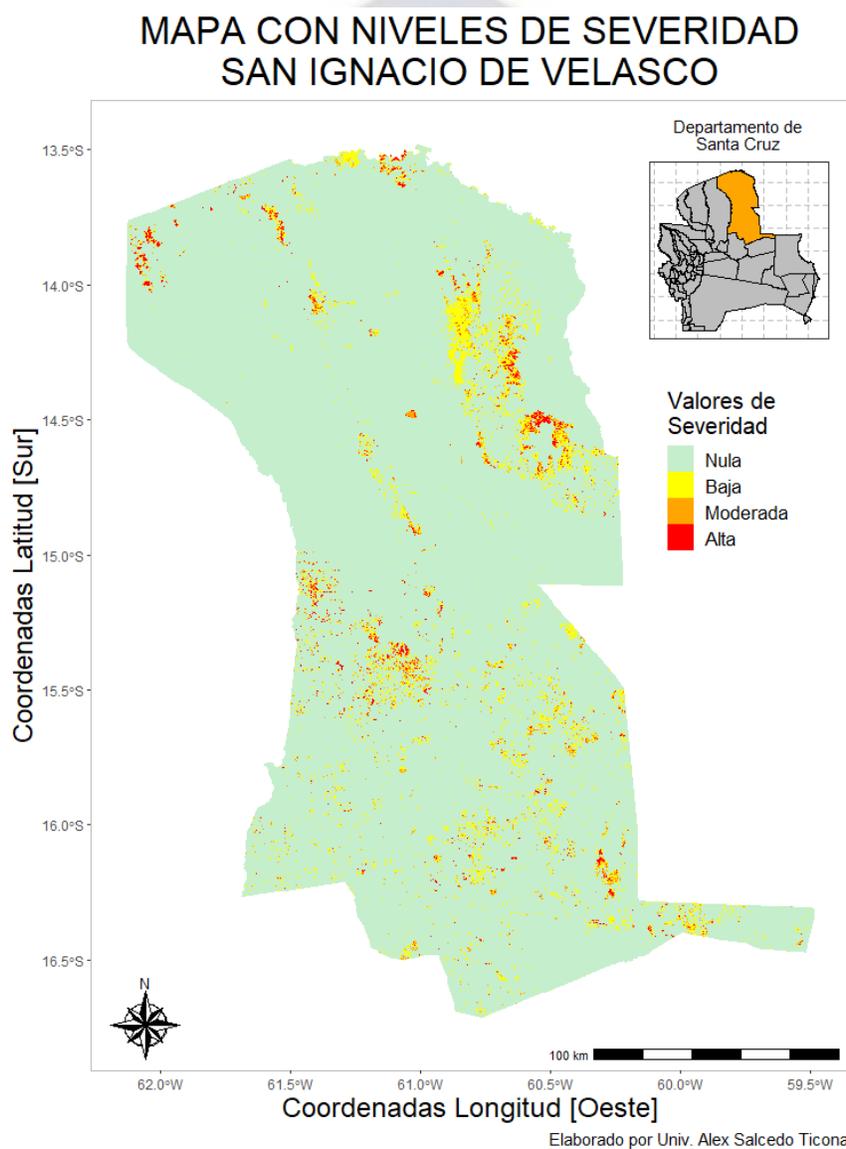
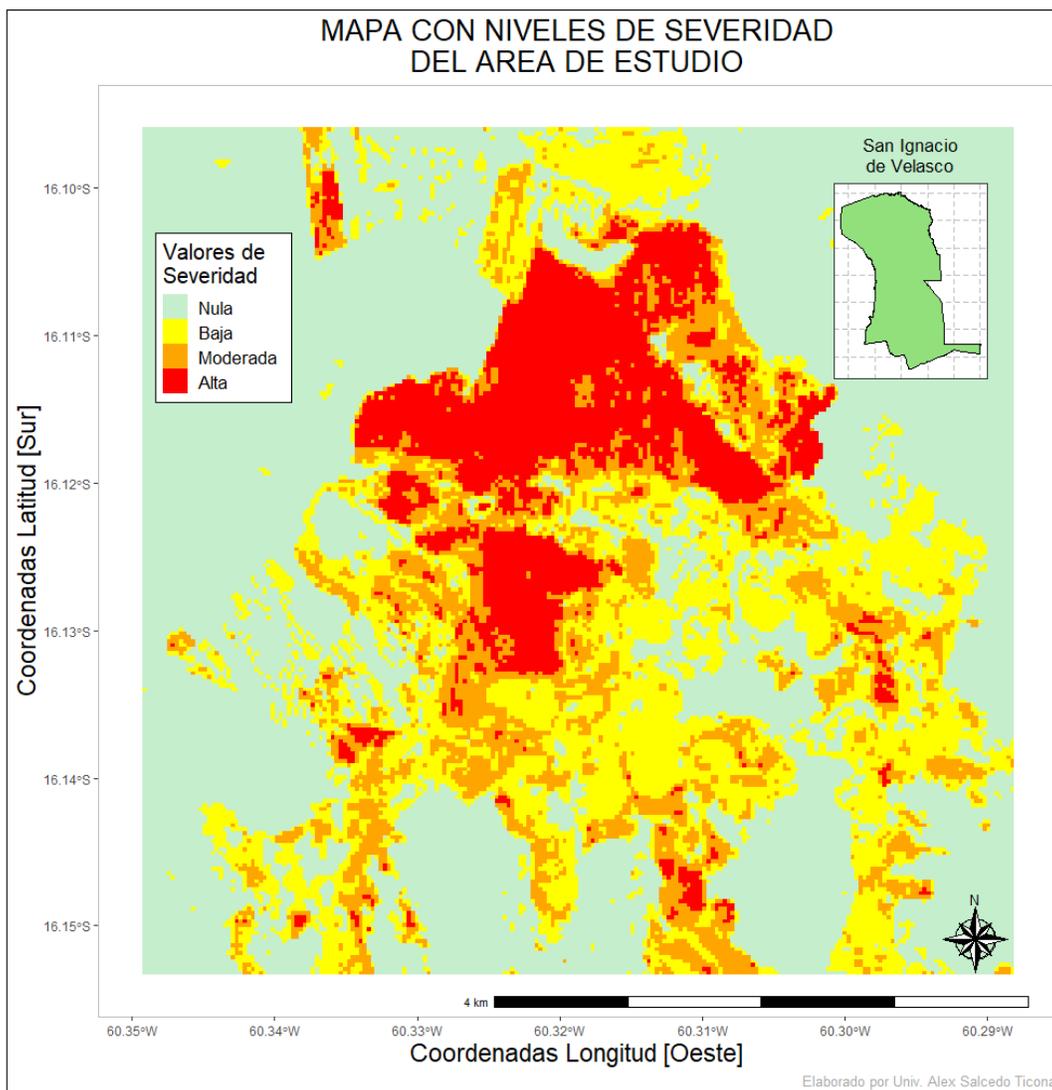


Ilustración 4.2 Mapa con diferentes severidades obtenido tras la aplicación del modelo hallado.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2. Resultados sobre el área de estudio.

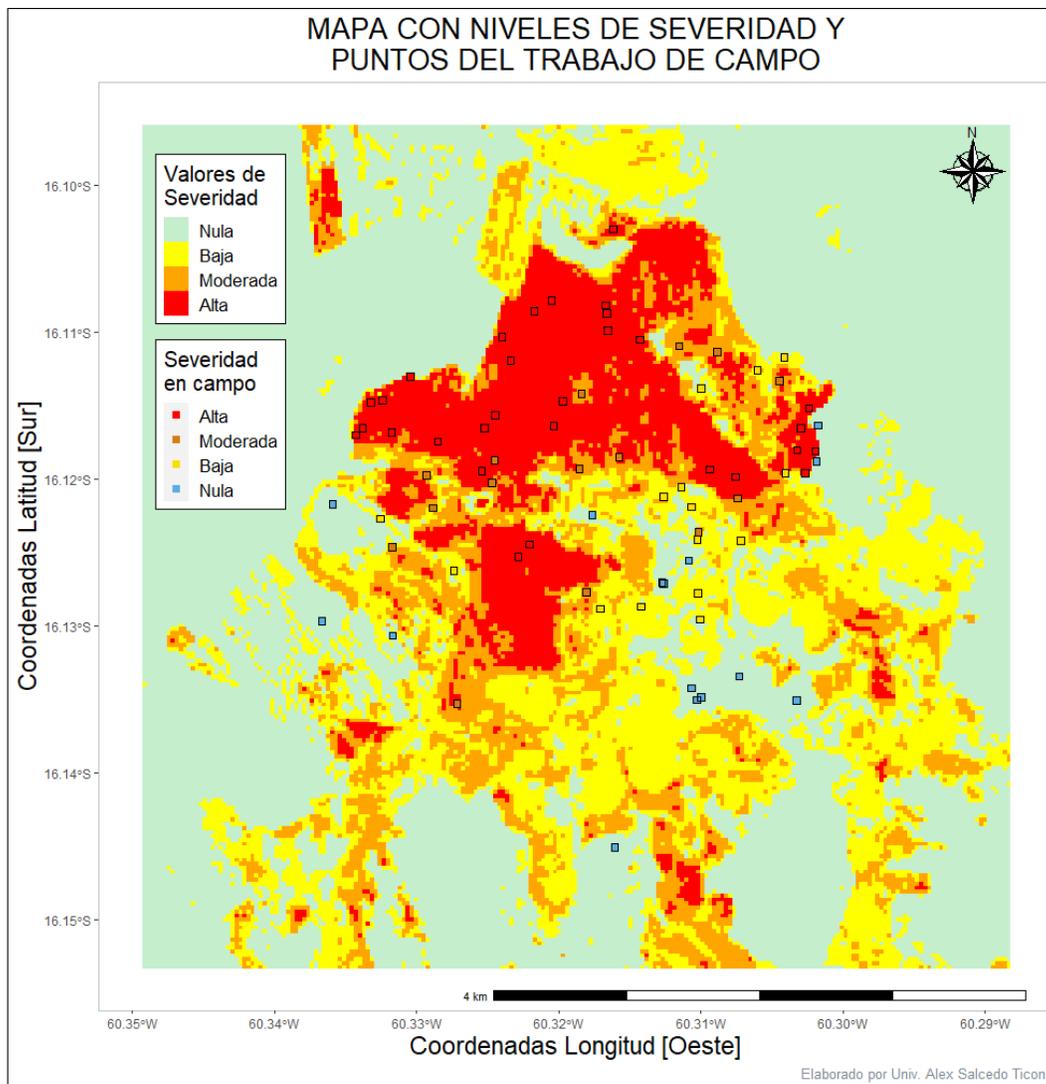
Sobre nuestra área de estudio se realizó la aplicación del modelo para la determinación de los niveles de severidad, y se obtuvo la siguiente ilustración donde se puede apreciar las diferentes severidades que fue capaz de predecir nuestro modelo.



*Ilustración 4.3 Mapa del área de estudio con aplicación del modelo para la determinación de la severidad.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Sobre nuestra anterior ilustración se realizó el gráfico de los puntos de estudio, los cuales fueron obtenidos mediante el trabajo de campo por el índice CBI, y se obtuvo la siguiente ilustración.



*Ilustración 4.4 Mapa del área de estudio con los puntos del trabajo de campo.*

*Fuente: Elaboración propia.*

En la ilustración se puede observar los puntos obtenidos en el trabajo de campo, donde, el color de cada uno tiene relación con el tipo de severidad determinado, así mismo se puede notar que la mayoría de los puntos coinciden con la severidad obtenida mediante el modelo.

Para nuestro mapa con niveles de severidad se calculó el área en metros cuadrados, hectáreas y porcentaje de cada tipo de severidad, con el fin de determinar la cantidad de suelo afectado para cada tipo de severidad. Este tipo de cálculos es necesario para que las diferentes

organizaciones de cuidado del medio ambiente puedan tomar medidas de restauración para las diferentes áreas quemadas.

<b>Resultados sobre incendios, gestión 2022</b>			
<b>Descripción</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Hectáreas</b>	<b>Porcentaje %</b>
Zonas estables o sin quemar	23.206.500,00	2.320,65	55,79%
Zonas quemadas con gravedad baja	8.896.500,00	889,65	21,39%
Zonas quemadas con gravedad moderada	5.064.300,00	506,43	12,18%
Zonas quemadas con gravedad alta	4.427.100,00	442,71	10,64%
Total	41.594.400,00	4.159,44	100%

*Tabla 4.4 Número de hectáreas afectadas en el área de estudio por cada tipo de severidad.*

*Fuente: Elaboración propia.*

En la anterior tabla claramente se puede observar que el área de suelo afectado por una severidad alta en la mayoría de las veces es menor al área de suelo afectado por una severidad moderada, y está a su vez será menor al área afectada por una severidad baja. En la mayoría de las veces se dan este tipo de resultados debido a que las áreas con severidad alta siempre se encuentran en el centro del incendio, luego vienen las áreas con severidad moderada, y en los contornos del incendio están las áreas con severidad baja.

## CAPÍTULO 5

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 5.1. Conclusiones.

- En el presente trabajo se logró determinar los diferentes grados de severidad en nuestra área de estudio, así también se determinó el número de hectáreas afectadas para cada categoría de severidad, mismo que puede ser utilizado por diferentes organizaciones ambientales como información para tomar diferentes medidas de evaluación y restauración de áreas afectadas.
- Se observó que las tomas del Satélite Landsat 8 presentan una amplia ventaja para trabajar con el procesamiento de imágenes de incendios forestales, ya que los mismos presentan una amplia resolución espacial por lo cual se podrá abarcar áreas de mayor superficie.
- Se halló un algoritmo y un modelo basado en el índice DNBR, con los cuales es posible determinar la severidad en los suelos por incendios forestales. Si bien en estudios semejantes la mayoría de los autores relacionan al índice DNBR con una tendencia lineal, para nuestro caso los resultados fueron más favorables con un modelo de regresión cúbico, esto debido a los diferentes niveles de severidad obtenidos en el trabajo de campo.
- Tras la aplicación de la corrección atmosférica, radiométrica y geométrica, se observa una gran mejoría en los niveles de reflectancia de la imagen, ya que omitir este tipo de correcciones en el preprocesamiento de las imágenes satelitales, nos generaría resultados sin significancia alguna.
- Se obtuvieron mapas satelitales donde es posible distinguir los diferentes tipos de severidad por incendios forestales, así mismo, se obtuvo la cantidad de hectáreas afectada por cada tipo de severidad. Esta severidad obtenida fue contrastada con la severidad obtenida en el trabajo de campo, donde se observa que existe una gran relación entre las mismas, corroborando los resultados de severidad obtenidos mediante el uso de la Teledetección.

- Se demostró que el estudio de un trabajo de campo focalizándonos en la severidad del suelo es de gran beneficio para la calibración del modelo generado, ya que en cualquier estudio de Teledetección no solo nos podemos quedar con el cálculo matemático, también es necesario la validación del modelo mediante los datos de campo.
- Tras la aplicación de diferentes índices como el RBR, RDNBR y DNBR se demostró que el índice espectral DNBR presenta mejor ajuste y es capaz de obtener una mejor estimación del nivel de severidad por daño en los suelos, en lo cual coincide con otros estudios congruentes. Sin embargo, el mismo presenta la dificultad de captar niveles altos de severidad por lo cual realizar un ajuste a este índice nos permite captar con mayor precisión los niveles con alto valor de severidad.
- Según la firma espectral de los suelos quemados y nuestro índice espectral DNBR aplicado, se determina que las bandas 5 y 7 del Satélite Landsat 8 son las bandas más competentes para observar los diferentes niveles de severidad, ya que las firmas espectrales de las áreas quemadas y la vegetación sana presentan mayor diferencia de reflectancia en las bandas mencionadas.
- Para el procesamiento de las imágenes se comprobó que el Software RStudio presenta una amplia robustez para trabajar con imágenes satelitales en Teledetección, así también se constató la gran capacidad del Software para realizar diferentes análisis estadísticos y cálculo matemático en imágenes satelitales.
- Aunque el análisis de la severidad en los suelos por Teledetección actualmente es una herramienta muy desarrollada con numerosas aplicaciones, es necesario la investigación y generación de productos más sofisticados para que su uso sea ventajoso y de mayor provecho por las diferentes entidades de cuidado del medio ambiente.

## 5.2. Recomendaciones.

Presentamos algunas recomendaciones para un correcto estudio de la severidad de los suelos por incendios forestales mediante técnicas de Teledetección.

- Para realizar un trabajo de campo existe la evaluación inicial y extendida, de los cuales se recomienda hacer una evaluación inicial, porque de esta manera se obtendrá medidas del índice CBI más exactos y cercanos a la sucesión del incendio por lo cual se tendrán resultados de mayor precisión.
- Se recomienda analizar muy bien el tipo de satélite a ser utilizado, tomando en cuenta los diferentes tipos de resolución, elaboración correcta del metadato, facilidad de procesar la imagen en un Software y la disponibilidad de la imagen para las fechas definidas del estudio.
- Para la corrección atmosférica con el método Flash se recomienda seguir los pasos mostrados en el capítulo 3, ya que este proceso hace uso del aerosol en la atmosfera para obtener niveles de reflectancia de mayor correspondencia con el área de estudio, así mismo es importante la normalización de valores para la aplicación de índices espectrales.
- En la calibración del modelo, si bien en la mayoría de estudios similares optan por realizar únicamente la regresión lineal, se recomienda acudir a diferentes tipos de regresión ya que se pueden obtener resultados con mayor fiabilidad.
- Ya que muchos autores utilizan el coeficiente de determinación R cuadrado para medir la calidad de una regresión, se recomienda acudir a otros indicadores estadísticos para la evaluación de un modelo o regresión, como es nuestro caso de utilizar el Criterio de Información de Akaike AIC.

## CAPÍTULO 6

### 6. ANEXOS.

A continuación, presentamos los datos utilizados para el análisis de regresión temporal estacionario.

#### 6.1. Análisis de temperatura.

AÑO	DÍA	PERIODO	TEMPERATURA REAL	PRONOSTICO TEMPERATURA	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE TEMPERATURA CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	1	3653	28,75	27,952	1,100	30,744	1,994	7%
2020	2	3654	30,81	27,953	1,179	32,948	2,138	7%
2020	3	3655	34,91	27,954	1,336	37,334	2,424	7%
2020	4	3656	33,89	27,955	1,297	36,245	2,355	7%
2020	5	3657	29,78	27,957	1,139	31,851	2,071	7%
2020	6	3658	27,73	27,958	1,061	29,659	1,929	7%
2020	7	3659	23,62	27,959	0,904	25,264	1,644	7%
2020	8	3660	28,75	27,960	1,100	30,753	2,003	7%
2020	9	3661	28,75	27,961	1,100	30,754	2,004	7%
2020	10	3662	30,81	27,962	1,179	32,959	2,149	7%
2020	11	3663	31,83	27,963	1,218	34,051	2,221	7%
2020	12	3664	32,86	27,964	1,257	35,154	2,294	7%
2020	13	3665	30,81	27,965	1,179	32,963	2,153	7%
2020	14	3666	30,81	27,966	1,179	32,964	2,154	7%
2020	15	3667	28,75	27,968	1,100	30,761	2,011	7%
2020	16	3668	31,83	27,969	1,218	34,058	2,228	7%
2020	17	3669	32,86	27,970	1,257	35,161	2,301	7%
2020	18	3670	32,86	27,971	1,257	35,163	2,303	7%
2020	19	3671	30,81	27,972	1,179	32,970	2,160	7%
2020	20	3672	31,83	27,973	1,218	34,063	2,233	7%
2020	21	3673	33,89	27,974	1,297	36,269	2,379	7%
2020	22	3674	29,78	27,975	1,139	31,872	2,092	7%
2020	23	3675	34,91	27,976	1,336	37,364	2,454	7%
2020	24	3676	33,89	27,977	1,297	36,274	2,384	7%

AÑO	DIA	PERIODO	TEMPERATURA REAL	PRONOSTICO TEMPERATURA	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE TEMPERATURA CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	25	3677	35,94	27,979	1,375	38,469	2,529	7%
2020	26	3678	35,94	27,980	1,375	38,471	2,531	7%
2020	27	3679	34,91	27,981	1,336	37,370	2,460	7%
2020	28	3680	30,81	27,982	1,179	32,982	2,172	7%
2020	29	3681	29,78	27,983	1,139	31,881	2,101	7%
2020	30	3682	23,62	27,984	0,904	25,287	1,667	7%
2020	31	3683	25,67	27,985	0,982	27,483	1,813	7%
2020	32	3684	31,83	27,986	1,218	34,079	2,249	7%
2020	33	3685	30,81	27,987	1,179	32,989	2,179	7%
2020	34	3686	28,75	27,988	1,100	30,784	2,034	7%
2020	35	3687	29,78	27,990	1,139	31,888	2,108	7%
2020	36	3688	29,78	27,991	1,139	31,890	2,110	7%
2020	37	3689	30,81	27,992	1,179	32,994	2,184	7%
2020	38	3690	30,81	27,993	1,179	32,995	2,185	7%
2020	39	3691	26,7	27,994	1,021	28,595	1,895	7%
2020	40	3692	29,78	27,995	1,139	31,895	2,115	7%
2020	41	3693	27,73	27,996	1,061	29,700	1,970	7%
2020	42	3694	26,7	27,997	1,021	28,598	1,898	7%
2020	43	3695	29,78	27,998	1,139	31,898	2,118	7%
2020	44	3696	29,78	28,000	1,139	31,900	2,120	7%
2020	45	3697	28,75	28,001	1,100	30,798	2,048	7%
2020	46	3698	30,81	28,002	1,179	33,006	2,196	7%
2020	47	3699	30,81	28,003	1,179	33,007	2,197	7%
2020	48	3700	31,83	28,004	1,218	34,101	2,271	7%
2020	49	3701	31,83	28,005	1,218	34,102	2,272	7%
2020	50	3702	29,78	28,006	1,139	31,907	2,127	7%
2020	51	3703	28,75	28,007	1,100	30,805	2,055	7%
2020	52	3704	23,62	28,008	0,904	25,309	1,689	7%
2020	53	3705	27,73	28,009	1,061	29,714	1,984	7%
2020	54	3706	25,67	28,011	0,982	27,508	1,838	7%
2020	55	3707	27,73	28,012	1,061	29,717	1,987	7%
2020	56	3708	28,75	28,013	1,100	30,811	2,061	7%
2020	57	3709	22,59	28,014	0,864	24,210	1,620	7%
2020	58	3710	29,78	28,015	1,139	31,917	2,137	7%

<b>AÑO</b>	<b>DIA</b>	<b>PERIODO</b>	<b>TEMPERATURA REAL</b>	<b>PRONOSTICO TEMPERATURA</b>	<b>ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD</b>	<b>PRONOSTICO DE TEMPERATURA CON ESTACIONALIDAD</b>	<b>ERROR (DAM)</b>	<b>ERROR (PEMA)%</b>
2020	59	3711	29,78	28,016	1,139	31,919	2,139	7%
2020	60	3712	31,83	28,017	1,218	34,117	2,287	7%
2020	61	3713	30,81	28,018	1,179	33,025	2,215	7%
2020	62	3714	31,83	28,019	1,218	34,120	2,290	7%
2020	63	3715	30,81	28,020	1,179	33,028	2,218	7%
2020	64	3716	31,83	28,022	1,218	34,122	2,292	7%
2020	65	3717	31,83	28,023	1,218	34,124	2,294	7%
2020	66	3718	31,83	28,024	1,218	34,125	2,295	7%
2020	67	3719	31,83	28,025	1,218	34,126	2,296	7%
2020	68	3720	32,86	28,026	1,257	35,232	2,372	7%
2020	69	3721	31,83	28,027	1,218	34,129	2,299	7%
2020	70	3722	31,83	28,028	1,218	34,130	2,300	7%
2020	71	3723	32,86	28,029	1,257	35,236	2,376	7%
2020	72	3724	32,86	28,030	1,257	35,238	2,378	7%
2020	73	3725	33,89	28,032	1,297	36,344	2,454	7%
2020	74	3726	32,86	28,033	1,257	35,240	2,380	7%
2020	75	3727	32,86	28,034	1,257	35,242	2,382	7%
2020	76	3728	31,83	28,035	1,218	34,139	2,309	7%
2020	77	3729	29,78	28,036	1,139	31,941	2,161	7%
2020	78	3730	30,81	28,037	1,179	33,047	2,237	7%
2020	79	3731	28,75	28,038	1,100	30,839	2,089	7%
2020	80	3732	25,67	28,039	0,982	27,536	1,866	7%
2020	81	3733	29,78	28,040	1,139	31,946	2,166	7%
2020	82	3734	30,81	28,041	1,179	33,052	2,242	7%
2020	83	3735	30,81	28,043	1,179	33,054	2,244	7%
2020	84	3736	29,78	28,044	1,139	31,950	2,170	7%
2020	85	3737	30,81	28,045	1,179	33,056	2,246	7%
2020	86	3738	23,62	28,046	0,904	25,343	1,723	7%
2020	87	3739	27,73	28,047	1,061	29,754	2,024	7%
2020	88	3740	29,78	28,048	1,139	31,955	2,175	7%
2020	89	3741	29,78	28,049	1,139	31,956	2,176	7%
2020	90	3742	29,78	28,050	1,139	31,957	2,177	7%
2020	91	3743	30,81	28,051	1,179	33,064	2,254	7%
2020	92	3744	31,83	28,052	1,218	34,160	2,330	7%

AÑO	DIA	PERIODO	TEMPERATURA REAL	PRONOSTICO TEMPERATURA	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE TEMPERATURA CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	93	3745	31,83	28,054	1,218	34,161	2,331	7%
2020	94	3746	27,73	28,055	1,061	29,762	2,032	7%
2020	95	3747	27,73	28,056	1,061	29,763	2,033	7%
2020	96	3748	29,78	28,057	1,139	31,965	2,185	7%
2020	97	3749	27,73	28,058	1,061	29,766	2,036	7%
2020	98	3750	25,67	28,059	0,982	27,556	1,886	7%
2020	99	3751	26,7	28,060	1,021	28,662	1,962	7%
2020	100	3752	25,67	28,061	0,982	27,558	1,888	7%
2020	101	3753	25,67	28,062	0,982	27,559	1,889	7%
2020	102	3754	26,7	28,064	1,021	28,666	1,966	7%
2020	103	3755	27,73	28,065	1,061	29,773	2,043	7%
2020	104	3756	28,75	28,066	1,100	30,869	2,119	7%
2020	105	3757	27,73	28,067	1,061	29,775	2,045	7%
2020	106	3758	25,67	28,068	0,982	27,564	1,894	7%
2020	107	3759	26,7	28,069	1,021	28,671	1,971	7%
2020	108	3760	26,7	28,070	1,021	28,673	1,973	7%
2020	109	3761	26,7	28,071	1,021	28,674	1,974	7%
2020	110	3762	28,75	28,072	1,100	30,876	2,126	7%
2020	111	3763	29,78	28,073	1,139	31,984	2,204	7%
2020	112	3764	30,81	28,075	1,179	33,091	2,281	7%
2020	113	3765	29,78	28,076	1,139	31,986	2,206	7%
2020	114	3766	29,78	28,077	1,139	31,988	2,208	7%
2020	115	3767	29,78	28,078	1,139	31,989	2,209	7%
2020	116	3768	28,75	28,079	1,100	30,884	2,134	7%
2020	117	3769	30,81	28,080	1,179	33,098	2,288	7%
2020	118	3770	29,78	28,081	1,139	31,993	2,213	7%
2020	119	3771	28,75	28,082	1,100	30,887	2,137	7%
2020	120	3772	26,7	28,083	1,021	28,686	1,986	7%
2020	121	3773	26,7	28,084	1,021	28,687	1,987	7%
2020	122	3774	27,73	28,086	1,061	29,795	2,065	7%
2020	123	3775	24,65	28,087	0,943	26,487	1,837	7%
2020	124	3776	25,67	28,088	0,982	27,584	1,914	7%
2020	125	3777	26,7	28,089	1,021	28,692	1,992	7%
2020	126	3778	27,73	28,090	1,061	29,800	2,070	7%

AÑO	DIA	PERIODO	TEMPERATURA REAL	PRONOSTICO TEMPERATURA	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE TEMPERATURA CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	127	3779	19,51	28,091	0,746	20,967	1,457	7%
2020	128	3780	19,51	28,092	0,746	20,968	1,458	7%
2020	129	3781	21,56	28,093	0,825	23,172	1,612	7%
2020	130	3782	22,59	28,094	0,864	24,280	1,690	7%
2020	131	3783	25,67	28,096	0,982	27,591	1,921	7%
2020	132	3784	27,73	28,097	1,061	29,807	2,077	7%
2020	133	3785	24,65	28,098	0,943	26,497	1,847	7%
2020	134	3786	21,56	28,099	0,825	23,176	1,616	7%
2020	135	3787	23,62	28,100	0,904	25,392	1,772	8%
2020	136	3788	22,59	28,101	0,864	24,286	1,696	8%
2020	137	3789	23,62	28,102	0,904	25,394	1,774	8%
2020	138	3790	24,65	28,103	0,943	26,502	1,852	8%
2020	139	3791	24,65	28,104	0,943	26,503	1,853	8%
2020	140	3792	26,7	28,105	1,021	28,709	2,009	8%
2020	141	3793	28,75	28,107	1,100	30,914	2,164	8%
2020	142	3794	27,73	28,108	1,061	29,818	2,088	8%
2020	143	3795	20,54	28,109	0,786	22,088	1,548	8%
2020	144	3796	17,46	28,110	0,668	18,776	1,316	8%
2020	145	3797	20,54	28,111	0,786	22,090	1,550	8%
2020	146	3798	23,62	28,112	0,904	25,403	1,783	8%
2020	147	3799	24,65	28,113	0,943	26,512	1,862	8%
2020	148	3800	24,65	28,114	0,943	26,513	1,863	8%
2020	149	3801	23,62	28,115	0,904	25,406	1,786	8%
2020	150	3802	24,65	28,116	0,943	26,515	1,865	8%
2020	151	3803	26,7	28,118	1,021	28,721	2,021	8%
2020	152	3804	26,7	28,119	1,021	28,722	2,022	8%
2020	153	3805	18,48	28,120	0,707	19,880	1,400	8%
2020	154	3806	17,46	28,121	0,668	18,784	1,324	8%
2020	155	3807	18,48	28,122	0,707	19,882	1,402	8%
2020	156	3808	15,4	28,123	0,589	16,569	1,169	8%
2020	157	3809	17,46	28,124	0,668	18,786	1,326	8%
2020	158	3810	22,59	28,125	0,864	24,307	1,717	8%
2020	159	3811	26,7	28,126	1,021	28,730	2,030	8%
2020	160	3812	27,73	28,127	1,061	29,839	2,109	8%

AÑO	DIA	PERIODO	TEMPERATURA REAL	PRONOSTICO TEMPERATURA	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE TEMPERATURA CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	161	3813	28,75	28,129	1,100	30,938	2,188	8%
2020	162	3814	28,75	28,130	1,100	30,940	2,190	8%
2020	163	3815	27,73	28,131	1,061	29,843	2,113	8%
2020	164	3816	28,75	28,132	1,100	30,942	2,192	8%
2020	165	3817	23,62	28,133	0,904	25,422	1,802	8%
2020	166	3818	22,59	28,134	0,864	24,314	1,724	8%
2020	167	3819	23,62	28,135	0,904	25,424	1,804	8%
2020	168	3820	25,67	28,136	0,982	27,631	1,961	8%
2020	169	3821	27,73	28,137	1,061	29,850	2,120	8%
2020	170	3822	27,73	28,139	1,061	29,851	2,121	8%
2020	171	3823	27,73	28,140	1,061	29,852	2,122	8%
2020	172	3824	27,73	28,141	1,061	29,854	2,124	8%
2020	173	3825	27,73	28,142	1,061	29,855	2,125	8%
2020	174	3826	25,67	28,143	0,982	27,638	1,968	8%
2020	175	3827	27,73	28,144	1,061	29,857	2,127	8%
2020	176	3828	27,73	28,145	1,061	29,858	2,128	8%
2020	177	3829	20,54	28,146	0,786	22,117	1,577	8%
2020	178	3830	15,4	28,147	0,589	16,583	1,183	8%
2020	179	3831	14,38	28,148	0,550	15,485	1,105	8%
2020	180	3832	18,48	28,150	0,707	19,901	1,421	8%
2020	181	3833	23,62	28,151	0,904	25,438	1,818	8%
2020	182	3834	27,73	28,152	1,061	29,865	2,135	8%
2020	183	3835	17,46	28,153	0,668	18,805	1,345	8%
2020	184	3836	17,46	28,154	0,668	18,806	1,346	8%
2020	185	3837	17,46	28,155	0,668	18,807	1,347	8%
2020	186	3838	22,59	28,156	0,864	24,333	1,743	8%
2020	187	3839	27,73	28,157	1,061	29,871	2,141	8%
2020	188	3840	21,56	28,158	0,825	23,226	1,666	8%
2020	189	3841	22,59	28,159	0,864	24,336	1,746	8%
2020	190	3842	15,4	28,161	0,589	16,591	1,191	8%
2020	191	3843	15,4	28,162	0,589	16,592	1,192	8%
2020	192	3844	21,56	28,163	0,825	23,229	1,669	8%
2020	193	3845	27,73	28,164	1,061	29,878	2,148	8%
2020	194	3846	27,73	28,165	1,061	29,879	2,149	8%

AÑO	DIA	PERIODO	TEMPERATURA REAL	PRONOSTICO TEMPERATURA	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE TEMPERATURA CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	195	3847	27,73	28,166	1,061	29,880	2,150	8%
2020	196	3848	20,54	28,167	0,786	22,134	1,594	8%
2020	197	3849	25,67	28,168	0,982	27,663	1,993	8%
2020	198	3850	28,75	28,169	1,100	30,983	2,233	8%
2020	199	3851	28,75	28,171	1,100	30,984	2,234	8%
2020	200	3852	29,78	28,172	1,139	32,096	2,316	8%
2020	201	3853	29,78	28,173	1,139	32,097	2,317	8%
2020	202	3854	29,78	28,174	1,139	32,098	2,318	8%
2020	203	3855	30,81	28,175	1,179	33,210	2,400	8%
2020	204	3856	29,78	28,176	1,139	32,101	2,321	8%
2020	205	3857	28,75	28,177	1,100	30,992	2,242	8%
2020	206	3858	21,56	28,178	0,825	23,242	1,682	8%
2020	207	3859	18,48	28,179	0,707	19,922	1,442	8%
2020	208	3860	21,56	28,180	0,825	23,244	1,684	8%
2020	209	3861	27,73	28,182	1,061	29,897	2,167	8%
2020	210	3862	23,62	28,183	0,904	25,467	1,847	8%
2020	211	3863	17,46	28,184	0,668	18,826	1,366	8%
2020	212	3864	20,54	28,185	0,786	22,148	1,608	8%
2020	213	3865	25,67	28,186	0,982	27,680	2,010	8%
2020	214	3866	28,75	28,187	1,100	31,003	2,253	8%
2020	215	3867	29,78	28,188	1,139	32,115	2,335	8%
2020	216	3868	29,78	28,189	1,139	32,116	2,336	8%
2020	217	3869	30,81	28,190	1,179	33,228	2,418	8%
2020	218	3870	29,78	28,191	1,139	32,118	2,338	8%
2020	219	3871	30,81	28,193	1,179	33,231	2,421	8%
2020	220	3872	30,81	28,194	1,179	33,232	2,422	8%
2020	221	3873	29,78	28,195	1,139	32,122	2,342	8%
2020	222	3874	30,81	28,196	1,179	33,234	2,424	8%
2020	223	3875	30,81	28,197	1,179	33,236	2,426	8%
2020	224	3876	26,7	28,198	1,021	28,803	2,103	8%
2020	225	3877	24,65	28,199	0,943	26,593	1,943	8%
2020	226	3878	27,73	28,200	1,061	29,917	2,187	8%
2020	227	3879	30,81	28,201	1,179	33,241	2,431	8%
2020	228	3880	30,81	28,203	1,179	33,242	2,432	8%

AÑO	DIA	PERIODO	TEMPERATURA REAL	PRONOSTICO TEMPERATURA	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE TEMPERATURA CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	229	3881	24,65	28,204	0,943	26,597	1,947	8%
2020	230	3882	22,59	28,205	0,864	24,375	1,785	8%
2020	231	3883	27,73	28,206	1,061	29,923	2,193	8%
2020	232	3884	23,62	28,207	0,904	25,489	1,869	8%
2020	233	3885	9,24	28,208	0,353	9,971	0,731	8%
2020	234	3886	13,35	28,209	0,511	14,407	1,057	8%
2020	235	3887	17,46	28,210	0,668	18,843	1,383	8%
2020	236	3888	20,54	28,211	0,786	22,168	1,628	8%
2020	237	3889	27,73	28,212	1,061	29,930	2,200	8%
2020	238	3890	30,81	28,214	1,179	33,255	2,445	8%
2020	239	3891	32,86	28,215	1,257	35,469	2,609	8%
2020	240	3892	31,83	28,216	1,218	34,359	2,529	8%
2020	241	3893	33,89	28,217	1,297	36,584	2,694	8%
2020	242	3894	33,89	28,218	1,297	36,585	2,695	8%
2020	243	3895	31,83	28,219	1,218	34,363	2,533	8%
2020	244	3896	26,7	28,220	1,021	28,826	2,126	8%
2020	245	3897	23,62	28,221	0,904	25,502	1,882	8%
2020	246	3898	21,56	28,222	0,825	23,278	1,718	8%
2020	247	3899	27,73	28,223	1,061	29,941	2,211	8%
2020	248	3900	30,81	28,225	1,179	33,268	2,458	8%
2020	249	3901	33,89	28,226	1,297	36,595	2,705	8%
2020	250	3902	34,91	28,227	1,336	37,698	2,788	8%
2020	251	3903	26,7	28,228	1,021	28,834	2,134	8%
2020	252	3904	28,75	28,229	1,100	31,049	2,299	8%
2020	253	3905	34,91	28,230	1,336	37,703	2,793	8%
2020	254	3906	35,94	28,231	1,375	38,817	2,877	8%
2020	255	3907	34,91	28,232	1,336	37,706	2,796	8%
2020	256	3908	35,94	28,233	1,375	38,820	2,880	8%
2020	257	3909	35,94	28,235	1,375	38,821	2,881	8%
2020	258	3910	28,75	28,236	1,100	31,056	2,306	8%
2020	259	3911	29,78	28,237	1,139	32,170	2,390	8%
2020	260	3912	35,94	28,238	1,375	38,826	2,886	8%
2020	261	3913	32,86	28,239	1,257	35,500	2,640	8%
2020	262	3914	30,81	28,240	1,179	33,286	2,476	8%

AÑO	DIA	PERIODO	TEMPERATURA REAL	PRONOSTICO TEMPERATURA	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE TEMPERATURA CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	263	3915	35,94	28,241	1,375	38,830	2,890	8%
2020	264	3916	26,7	28,242	1,021	28,848	2,148	8%
2020	265	3917	25,67	28,243	0,982	27,737	2,067	8%
2020	266	3918	28,75	28,244	1,100	31,066	2,316	8%
2020	267	3919	31,83	28,246	1,218	34,395	2,565	8%
2020	268	3920	34,91	28,247	1,336	37,725	2,815	8%
2020	269	3921	34,91	28,248	1,336	37,726	2,816	8%
2020	270	3922	35,94	28,249	1,375	38,841	2,901	8%
2020	271	3923	30,81	28,250	1,179	33,298	2,488	8%
2020	272	3924	26,7	28,251	1,021	28,857	2,157	8%
2020	273	3925	31,83	28,252	1,218	34,403	2,573	8%
2020	274	3926	33,89	28,253	1,297	36,631	2,741	8%
2020	275	3927	35,94	28,254	1,375	38,848	2,908	8%
2020	276	3928	36,97	28,255	1,414	39,963	2,993	8%
2020	277	3929	32,86	28,257	1,257	35,522	2,662	8%
2020	278	3930	32,86	28,258	1,257	35,523	2,663	8%
2020	279	3931	33,89	28,259	1,297	36,638	2,748	8%
2020	280	3932	36,97	28,260	1,414	39,970	3,000	8%
2020	281	3933	38	28,261	1,454	41,085	3,085	8%
2020	282	3934	35,94	28,262	1,375	38,859	2,919	8%
2020	283	3935	38	28,263	1,454	41,088	3,088	8%
2020	284	3936	34,91	28,264	1,336	37,748	2,838	8%
2020	285	3937	34,91	28,265	1,336	37,750	2,840	8%
2020	286	3938	38	28,266	1,454	41,093	3,093	8%
2020	287	3939	34,91	28,268	1,336	37,753	2,843	8%
2020	288	3940	35,94	28,269	1,375	38,868	2,928	8%
2020	289	3941	29,78	28,270	1,139	32,208	2,428	8%
2020	290	3942	27,73	28,271	1,061	29,992	2,262	8%
2020	291	3943	32,86	28,272	1,257	35,541	2,681	8%
2020	292	3944	34,91	28,273	1,336	37,760	2,850	8%
2020	293	3945	34,91	28,274	1,336	37,762	2,852	8%
2020	294	3946	32,86	28,275	1,257	35,546	2,686	8%
2020	295	3947	28,75	28,276	1,100	31,101	2,351	8%
2020	296	3948	30,81	28,278	1,179	33,331	2,521	8%

AÑO	DIA	PERIODO	TEMPERATURA REAL	PRONOSTICO TEMPERATURA	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE TEMPERATURA CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	297	3949	31,83	28,279	1,218	34,435	2,605	8%
2020	298	3950	33,89	28,280	1,297	36,665	2,775	8%
2020	299	3951	34,91	28,281	1,336	37,770	2,860	8%
2020	300	3952	27,73	28,282	1,061	30,003	2,273	8%
2020	301	3953	31,83	28,283	1,218	34,441	2,611	8%
2020	302	3954	32,86	28,284	1,257	35,557	2,697	8%
2020	303	3955	26,7	28,285	1,021	28,892	2,192	8%
2020	304	3956	27,73	28,286	1,061	30,008	2,278	8%
2020	305	3957	28,75	28,287	1,100	31,113	2,363	8%
2020	306	3958	29,78	28,289	1,139	32,229	2,449	8%
2020	307	3959	30,81	28,290	1,179	33,345	2,535	8%
2020	308	3960	33,89	28,291	1,297	36,680	2,790	8%
2020	309	3961	34,91	28,292	1,336	37,785	2,875	8%
2020	310	3962	35,94	28,293	1,375	38,902	2,962	8%
2020	311	3963	35,94	28,294	1,375	38,903	2,963	8%
2020	312	3964	38	28,295	1,454	41,135	3,135	8%
2020	313	3965	38	28,296	1,454	41,136	3,136	8%
2020	314	3966	34,91	28,297	1,336	37,793	2,883	8%
2020	315	3967	32,86	28,298	1,257	35,575	2,715	8%
2020	316	3968	31,83	28,300	1,218	34,461	2,631	8%
2020	317	3969	28,75	28,301	1,100	31,128	2,378	8%
2020	318	3970	29,78	28,302	1,139	32,244	2,464	8%
2020	319	3971	30,81	28,303	1,179	33,361	2,551	8%
2020	320	3972	30,81	28,304	1,179	33,362	2,552	8%
2020	321	3973	26,7	28,305	1,021	28,913	2,213	8%
2020	322	3974	26,7	28,306	1,021	28,914	2,214	8%
2020	323	3975	21,56	28,307	0,825	23,348	1,788	8%
2020	324	3976	28,75	28,308	1,100	31,136	2,386	8%
2020	325	3977	30,81	28,310	1,179	33,368	2,558	8%
2020	326	3978	32,86	28,311	1,257	35,590	2,730	8%
2020	327	3979	33,89	28,312	1,297	36,707	2,817	8%
2020	328	3980	35,94	28,313	1,375	38,929	2,989	8%
2020	329	3981	35,94	28,314	1,375	38,930	2,990	8%
2020	330	3982	35,94	28,315	1,375	38,932	2,992	8%

AÑO	DIA	PERIODO	TEMPERATURA REAL	PRONOSTICO TEMPERATURA	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE TEMPERATURA CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	331	3983	34,91	28,316	1,336	37,818	2,908	8%
2020	332	3984	32,86	28,317	1,257	35,598	2,738	8%
2020	333	3985	31,83	28,318	1,218	34,484	2,654	8%
2020	334	3986	33,89	28,319	1,297	36,717	2,827	8%
2020	335	3987	34,91	28,321	1,336	37,824	2,914	8%
2020	336	3988	31,83	28,322	1,218	34,488	2,658	8%
2020	337	3989	33,89	28,323	1,297	36,721	2,831	8%
2020	338	3990	27,73	28,324	1,061	30,048	2,318	8%
2020	339	3991	27,73	28,325	1,061	30,049	2,319	8%
2020	340	3992	22,59	28,326	0,864	24,480	1,890	8%
2020	341	3993	28,75	28,327	1,100	31,157	2,407	8%
2020	342	3994	29,78	28,328	1,139	32,274	2,494	8%
2020	343	3995	32,86	28,329	1,257	35,614	2,754	8%
2020	344	3996	27,73	28,330	1,061	30,055	2,325	8%
2020	345	3997	29,78	28,332	1,139	32,278	2,498	8%
2020	346	3998	25,67	28,333	0,982	27,824	2,154	8%
2020	347	3999	29,78	28,334	1,139	32,280	2,500	8%
2020	348	4000	29,78	28,335	1,139	32,282	2,502	8%
2020	349	4001	25,67	28,336	0,982	27,828	2,158	8%
2020	350	4002	26,7	28,337	1,021	28,945	2,245	8%
2020	351	4003	30,81	28,338	1,179	33,402	2,592	8%
2020	352	4004	30,81	28,339	1,179	33,403	2,593	8%
2020	353	4005	32,86	28,340	1,257	35,627	2,767	8%
2020	354	4006	33,89	28,342	1,297	36,746	2,856	8%
2020	355	4007	31,83	28,343	1,218	34,513	2,683	8%
2020	356	4008	29,78	28,344	1,139	32,292	2,512	8%
2020	357	4009	32,86	28,345	1,257	35,633	2,773	8%
2020	358	4010	33,89	28,346	1,297	36,751	2,861	8%
2020	359	4011	33,89	28,347	1,297	36,753	2,863	8%
2020	360	4012	32,86	28,348	1,257	35,637	2,777	8%
2020	361	4013	28,75	28,349	1,100	31,181	2,431	8%
2020	362	4014	32,86	28,350	1,257	35,640	2,780	8%
2020	363	4015	28,75	28,351	1,100	31,183	2,433	8%
2020	364	4016	29,78	28,353	1,139	32,302	2,522	8%

AÑO	DIA	PERIODO	TEMPERATURA REAL	PRONOSTICO TEMPERATURA	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE TEMPERATURA CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	365	4017	30,81	28,354	1,179	33,420	2,610	8%
2020	366	4018	31,83	28,355	1,218	34,528	2,698	8%
ERROR (DAM) Y (PEMA)							1,11148231	4%

## 6.2. Análisis de humedad.

AÑO	DIA	PERIODO	HUMEDAD	PRONOSTICO HUMEDAD	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE HUMEDAD CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	1	3653	79	57,3020	1,1602	66,4827	12,5173	16%
2020	2	3654	61	57,2955	0,8959	51,3288	9,6712	16%
2020	3	3655	46	57,2889	0,6756	38,7026	7,2974	16%
2020	4	3656	45	57,2823	0,6609	37,8569	7,1431	16%
2020	5	3657	61	57,2758	0,8959	51,3112	9,6888	16%
2020	6	3658	71	57,2692	1,0427	59,7160	11,2840	16%
2020	7	3659	91	57,2627	1,3364	76,5287	14,4713	16%
2020	8	3660	73	57,2561	1,0721	61,3841	11,6159	16%
2020	9	3661	68	57,2495	0,9987	57,1731	10,8269	16%
2020	10	3662	65	57,2430	0,9546	54,6445	10,3555	16%
2020	11	3663	60	57,2364	0,8812	50,4353	9,5647	16%
2020	12	3664	61	57,2298	0,8959	51,2700	9,7300	16%
2020	13	3665	67	57,2233	0,9840	56,3065	10,6935	16%
2020	14	3666	70	57,2167	1,0280	58,8210	11,1790	16%
2020	15	3667	70	57,2101	1,0280	58,8142	11,1858	16%
2020	16	3668	64	57,2036	0,9399	53,7668	10,2332	16%
2020	17	3669	58	57,1970	0,8518	48,7206	9,2794	16%
2020	18	3670	55	57,1904	0,8077	46,1953	8,8047	16%
2020	19	3671	67	57,1839	0,9840	56,2678	10,7322	16%
2020	20	3672	60	57,1773	0,8812	50,3833	9,6167	16%

AÑO	DIA	PERIODO	HUMEDAD	PRONOSTICO HUMEDAD	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE HUMEDAD CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	21	3673	55	57,1707	0,8077	46,1794	8,8206	16%
2020	22	3674	71	57,1642	1,0427	59,6065	11,3935	16%
2020	23	3675	41	57,1576	0,6021	34,4167	6,5833	16%
2020	24	3676	34	57,1511	0,4993	28,5374	5,4626	16%
2020	25	3677	32	57,1445	0,4700	26,8556	5,1444	16%
2020	26	3678	40	57,1379	0,5875	33,5657	6,4343	16%
2020	27	3679	49	57,1314	0,7196	41,1133	7,8867	16%
2020	28	3680	66	57,1248	0,9693	55,3707	10,6293	16%
2020	29	3681	67	57,1182	0,9840	56,2032	10,7968	16%
2020	30	3682	89	57,1117	1,3071	74,6494	14,3506	16%
2020	31	3683	71	57,1051	1,0427	59,5449	11,4551	16%
2020	32	3684	56	57,0985	0,8224	46,9596	9,0404	16%
2020	33	3685	64	57,0920	0,9399	53,6619	10,3381	16%
2020	34	3686	74	57,0854	1,0868	62,0395	11,9605	16%
2020	35	3687	69	57,0788	1,0134	57,8410	11,1590	16%
2020	36	3688	68	57,0723	0,9987	56,9961	11,0039	16%
2020	37	3689	67	57,0657	0,9840	56,1515	10,8485	16%
2020	38	3690	71	57,0592	1,0427	59,4970	11,5030	16%
2020	39	3691	86	57,0526	1,2630	72,0585	13,9415	16%
2020	40	3692	77	57,0460	1,1308	64,5101	12,4899	16%
2020	41	3693	85	57,0395	1,2483	71,2042	13,7958	16%
2020	42	3694	82	57,0329	1,2043	68,6832	13,3168	16%
2020	43	3695	71	57,0263	1,0427	59,4628	11,5372	16%
2020	44	3696	68	57,0198	0,9987	56,9437	11,0563	16%
2020	45	3697	74	57,0132	1,0868	61,9610	12,0390	16%
2020	46	3698	68	57,0066	0,9987	56,9306	11,0694	16%
2020	47	3699	64	57,0001	0,9399	53,5756	10,4244	16%
2020	48	3700	63	56,9935	0,9252	52,7324	10,2676	16%
2020	49	3701	66	56,9869	0,9693	55,2371	10,7629	16%
2020	50	3702	72	56,9804	1,0574	60,2517	11,7483	16%
2020	51	3703	76	56,9738	1,1162	63,5917	12,4083	16%
2020	52	3704	79	56,9672	1,1602	66,0942	12,9058	16%
2020	53	3705	39	56,9607	0,5728	32,6250	6,3750	16%
2020	54	3706	44	56,9541	0,6462	36,8035	7,1965	16%

AÑO	DIA	PERIODO	HUMEDAD	PRONOSTICO HUMEDAD	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE HUMEDAD CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	55	3707	51	56,9476	0,7490	42,6537	8,3463	16%
2020	56	3708	62	56,9410	0,9105	51,8475	10,1525	16%
2020	57	3709	90	56,9344	1,3218	75,2539	14,7461	16%
2020	58	3710	58	56,9279	0,8518	48,4913	9,5087	16%
2020	59	3711	60	56,9213	0,8812	50,1577	9,8423	16%
2020	60	3712	46	56,9147	0,6756	38,4498	7,5502	16%
2020	61	3713	38	56,9082	0,5581	31,7592	6,2408	16%
2020	62	3714	40	56,9016	0,5875	33,4269	6,5731	16%
2020	63	3715	48	56,8950	0,7049	40,1076	7,8924	16%
2020	64	3716	49	56,8885	0,7196	40,9385	8,0615	16%
2020	65	3717	51	56,8819	0,7490	42,6045	8,3955	16%
2020	66	3718	47	56,8753	0,6903	39,2585	7,7415	16%
2020	67	3719	52	56,8688	0,7637	43,4299	8,5701	16%
2020	68	3720	55	56,8622	0,8077	45,9301	9,0699	16%
2020	69	3721	60	56,8557	0,8812	50,0998	9,9002	17%
2020	70	3722	54	56,8491	0,7931	45,0846	8,9154	17%
2020	71	3723	45	56,8425	0,6609	37,5662	7,4338	17%
2020	72	3724	50	56,8360	0,7343	41,7354	8,2646	17%
2020	73	3725	49	56,8294	0,7196	40,8960	8,1040	17%
2020	74	3726	54	56,8228	0,7931	45,0638	8,9362	17%
2020	75	3727	54	56,8163	0,7931	45,0586	8,9414	17%
2020	76	3728	60	56,8097	0,8812	50,0593	9,9407	17%
2020	77	3729	67	56,8031	0,9840	55,8931	11,1069	17%
2020	78	3730	70	56,7966	1,0280	58,3891	11,6109	17%
2020	79	3731	78	56,7900	1,1455	65,0546	12,9454	17%
2020	80	3732	63	56,7834	0,9252	52,5380	10,4620	17%
2020	81	3733	51	56,7769	0,7490	42,5258	8,4742	17%
2020	82	3734	60	56,7703	0,8812	50,0246	9,9754	17%
2020	83	3735	65	56,7637	0,9546	54,1871	10,8129	17%
2020	84	3736	76	56,7572	1,1162	63,3499	12,6501	17%
2020	85	3737	71	56,7506	1,0427	59,1753	11,8247	17%
2020	86	3738	82	56,7441	1,2043	68,3354	13,6646	17%
2020	87	3739	60	56,7375	0,8812	49,9957	10,0043	17%
2020	88	3740	63	56,7309	0,9252	52,4894	10,5106	17%

AÑO	DIA	PERIODO	HUMEDAD	PRONOSTICO HUMEDAD	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE HUMEDAD CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	89	3741	75	56,7244	1,1015	62,4802	12,5198	17%
2020	90	3742	79	56,7178	1,1602	65,8048	13,1952	17%
2020	91	3743	70	56,7112	1,0280	58,3013	11,6987	17%
2020	92	3744	66	56,7047	0,9693	54,9635	11,0365	17%
2020	93	3745	64	56,6981	0,9399	53,2917	10,7083	17%
2020	94	3746	61	56,6915	0,8959	50,7878	10,2122	17%
2020	95	3747	57	56,6850	0,8371	47,4520	9,5480	17%
2020	96	3748	63	56,6784	0,9252	52,4408	10,5592	17%
2020	97	3749	76	56,6718	1,1162	63,2546	12,7454	17%
2020	98	3750	64	56,6653	0,9399	53,2609	10,7391	17%
2020	99	3751	50	56,6587	0,7343	41,6052	8,3948	17%
2020	100	3752	37	56,6522	0,5434	30,7843	6,2157	17%
2020	101	3753	38	56,6456	0,5581	31,6127	6,3873	17%
2020	102	3754	41	56,6390	0,6021	34,1044	6,8956	17%
2020	103	3755	49	56,6325	0,7196	40,7542	8,2458	17%
2020	104	3756	59	56,6259	0,8665	49,0657	9,9343	17%
2020	105	3757	47	56,6193	0,6903	39,0817	7,9183	17%
2020	106	3758	37	56,6128	0,5434	30,7629	6,2371	17%
2020	107	3759	34	56,6062	0,4993	28,2653	5,7347	17%
2020	108	3760	30	56,5996	0,4406	24,9371	5,0629	17%
2020	109	3761	35	56,5931	0,5140	29,0899	5,9101	17%
2020	110	3762	37	56,5865	0,5434	30,7486	6,2514	17%
2020	111	3763	49	56,5799	0,7196	40,7164	8,2836	17%
2020	112	3764	58	56,5734	0,8518	48,1894	9,8106	17%
2020	113	3765	59	56,5668	0,8665	49,0146	9,9854	17%
2020	114	3766	63	56,5602	0,9252	52,3315	10,6685	17%
2020	115	3767	64	56,5537	0,9399	53,1560	10,8440	17%
2020	116	3768	68	56,5471	0,9987	56,4717	11,5283	17%
2020	117	3769	65	56,5406	0,9546	53,9740	11,0260	17%
2020	118	3770	64	56,5340	0,9399	53,1375	10,8625	17%
2020	119	3771	66	56,5274	0,9693	54,7917	11,2083	17%
2020	120	3772	83	56,5209	1,2190	68,8967	14,1033	17%
2020	121	3773	77	56,5143	1,1308	63,9088	13,0912	17%
2020	122	3774	75	56,5077	1,1015	62,2416	12,7584	17%

AÑO	DIA	PERIODO	HUMEDAD	PRONOSTICO HUMEDAD	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE HUMEDAD CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	123	3775	80	56,5012	1,1749	66,3833	13,6167	17%
2020	124	3776	75	56,4946	1,1015	62,2271	12,7729	17%
2020	125	3777	76	56,4880	1,1162	63,0495	12,9505	17%
2020	126	3778	71	56,4815	1,0427	58,8946	12,1054	17%
2020	127	3779	71	56,4749	1,0427	58,8878	12,1122	17%
2020	128	3780	43	56,4683	0,6315	35,6603	7,3397	17%
2020	129	3781	46	56,4618	0,6756	38,1438	7,8562	17%
2020	130	3782	55	56,4552	0,8077	45,6014	9,3986	17%
2020	131	3783	59	56,4487	0,8665	48,9122	10,0878	17%
2020	132	3784	65	56,4421	0,9546	53,8800	11,1200	17%
2020	133	3785	82	56,4355	1,2043	67,9638	14,0362	17%
2020	134	3786	70	56,4290	1,0280	58,0111	11,9889	17%
2020	135	3787	45	56,4224	0,6609	37,2885	7,7115	17%
2020	136	3788	41	56,4158	0,6021	33,9700	7,0300	17%
2020	137	3789	34	56,4093	0,4993	28,1670	5,8330	17%
2020	138	3790	38	56,4027	0,5581	31,4771	6,5229	17%
2020	139	3791	62	56,3961	0,9105	51,3514	10,6486	17%
2020	140	3792	61	56,3896	0,8959	50,5173	10,4827	17%
2020	141	3793	61	56,3830	0,8959	50,5114	10,4886	17%
2020	142	3794	71	56,3764	1,0427	58,7851	12,2149	17%
2020	143	3795	84	56,3699	1,2336	69,5405	14,4595	17%
2020	144	3796	34	56,3633	0,4993	28,1441	5,8559	17%
2020	145	3797	31	56,3567	0,4553	25,6578	5,3422	17%
2020	146	3798	41	56,3502	0,6021	33,9305	7,0695	17%
2020	147	3799	41	56,3436	0,6021	33,9266	7,0734	17%
2020	148	3800	45	56,3371	0,6609	37,2321	7,7679	17%
2020	149	3801	55	56,3305	0,8077	45,5006	9,4994	17%
2020	150	3802	55	56,3239	0,8077	45,4953	9,5047	17%
2020	151	3803	55	56,3174	0,8077	45,4900	9,5100	17%
2020	152	3804	53	56,3108	0,7784	43,8307	9,1693	17%
2020	153	3805	48	56,3042	0,7049	39,6911	8,3089	17%
2020	154	3806	52	56,2977	0,7637	42,9937	9,0063	17%
2020	155	3807	70	56,2911	1,0280	57,8694	12,1306	17%
2020	156	3808	90	56,2845	1,3218	74,3949	15,6051	17%

AÑO	DIA	PERIODO	HUMEDAD	PRONOSTICO HUMEDAD	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE HUMEDAD CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	157	3809	79	56,2780	1,1602	65,2945	13,7055	17%
2020	158	3810	65	56,2714	0,9546	53,7171	11,2829	17%
2020	159	3811	68	56,2648	0,9987	56,1898	11,8102	17%
2020	160	3812	69	56,2583	1,0134	57,0094	11,9906	17%
2020	161	3813	67	56,2517	0,9840	55,3505	11,6495	17%
2020	162	3814	64	56,2452	0,9399	52,8660	11,1340	17%
2020	163	3815	63	56,2386	0,9252	52,0339	10,9661	17%
2020	164	3816	58	56,2320	0,8518	47,8986	10,1014	17%
2020	165	3817	78	56,2255	1,1455	64,4079	13,5921	17%
2020	166	3818	51	56,2189	0,7490	42,1079	8,8921	17%
2020	167	3819	56	56,2123	0,8224	46,2307	9,7693	17%
2020	168	3820	64	56,2058	0,9399	52,8290	11,1710	17%
2020	169	3821	58	56,1992	0,8518	47,8707	10,1293	17%
2020	170	3822	56	56,1926	0,8224	46,2145	9,7855	17%
2020	171	3823	61	56,1861	0,8959	50,3350	10,6650	17%
2020	172	3824	62	56,1795	0,9105	51,1542	10,8458	17%
2020	173	3825	59	56,1729	0,8665	48,6733	10,3267	18%
2020	174	3826	69	56,1664	1,0134	56,9163	12,0837	18%
2020	175	3827	62	56,1598	0,9105	51,1362	10,8638	18%
2020	176	3828	60	56,1532	0,8812	49,4809	10,5191	18%
2020	177	3829	78	56,1467	1,1455	64,3176	13,6824	18%
2020	178	3830	71	56,1401	1,0427	58,5387	12,4613	18%
2020	179	3831	55	56,1336	0,8077	45,3416	9,6584	18%
2020	180	3832	55	56,1270	0,8077	45,3363	9,6637	18%
2020	181	3833	66	56,1204	0,9693	54,3972	11,6028	18%
2020	182	3834	60	56,1139	0,8812	49,4462	10,5538	18%
2020	183	3835	39	56,1073	0,5728	32,1363	6,8637	18%
2020	184	3836	32	56,1007	0,4700	26,3651	5,6349	18%
2020	185	3837	42	56,0942	0,6168	34,6002	7,3998	18%
2020	186	3838	53	56,0876	0,7784	43,6570	9,3430	18%
2020	187	3839	59	56,0810	0,8665	48,5936	10,4064	18%
2020	188	3840	76	56,0745	1,1162	62,5879	13,4121	18%
2020	189	3841	73	56,0679	1,0721	60,1102	12,8898	18%
2020	190	3842	69	56,0613	1,0134	56,8099	12,1901	18%

AÑO	DIA	PERIODO	HUMEDAD	PRONOSTICO HUMEDAD	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE HUMEDAD CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	191	3843	66	56,0548	0,9693	54,3335	11,6665	18%
2020	192	3844	65	56,0482	0,9546	53,5040	11,4960	18%
2020	193	3845	58	56,0417	0,8518	47,7365	10,2635	18%
2020	194	3846	61	56,0351	0,8959	50,1997	10,8003	18%
2020	195	3847	61	56,0285	0,8959	50,1938	10,8062	18%
2020	196	3848	78	56,0220	1,1455	64,1747	13,8253	18%
2020	197	3849	59	56,0154	0,8665	48,5368	10,4632	18%
2020	198	3850	59	56,0088	0,8665	48,5311	10,4689	18%
2020	199	3851	58	56,0023	0,8518	47,7029	10,2971	18%
2020	200	3852	52	55,9957	0,7637	42,7631	9,2369	18%
2020	201	3853	47	55,9891	0,6903	38,6467	8,3533	18%
2020	202	3854	45	55,9826	0,6609	36,9979	8,0021	18%
2020	203	3855	45	55,9760	0,6609	36,9935	8,0065	18%
2020	204	3856	44	55,9694	0,6462	36,1672	7,8328	18%
2020	205	3857	53	55,9629	0,7784	43,5599	9,4401	18%
2020	206	3858	47	55,9563	0,6903	38,6241	8,3759	18%
2020	207	3859	32	55,9497	0,4700	26,2942	5,7058	18%
2020	208	3860	38	55,9432	0,5581	31,2207	6,7793	18%
2020	209	3861	50	55,9366	0,7343	41,0750	8,9250	18%
2020	210	3862	51	55,9301	0,7490	41,8916	9,1084	18%
2020	211	3863	31	55,9235	0,4553	25,4605	5,5395	18%
2020	212	3864	28	55,9169	0,4112	22,9939	5,0061	18%
2020	213	3865	43	55,9104	0,6315	35,3079	7,6921	18%
2020	214	3866	41	55,9038	0,6021	33,6617	7,3383	18%
2020	215	3867	38	55,8972	0,5581	31,1950	6,8050	18%
2020	216	3868	34	55,8907	0,4993	27,9081	6,0919	18%
2020	217	3869	37	55,8841	0,5434	30,3670	6,6330	18%
2020	218	3870	38	55,8775	0,5581	31,1840	6,8160	18%
2020	219	3871	36	55,8710	0,5287	29,5393	6,4607	18%
2020	220	3872	35	55,8644	0,5140	28,7154	6,2846	18%
2020	221	3873	35	55,8578	0,5140	28,7120	6,2880	18%
2020	222	3874	34	55,8513	0,4993	27,8884	6,1116	18%
2020	223	3875	37	55,8447	0,5434	30,3456	6,6544	18%
2020	224	3876	44	55,8382	0,6462	36,0824	7,9176	18%

AÑO	DIA	PERIODO	HUMEDAD	PRONOSTICO HUMEDAD	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE HUMEDAD CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	225	3877	51	55,8316	0,7490	41,8178	9,1822	18%
2020	226	3878	48	55,8250	0,7049	39,3533	8,6467	18%
2020	227	3879	54	55,8185	0,7931	44,2673	9,7327	18%
2020	228	3880	45	55,8119	0,6609	36,8851	8,1149	18%
2020	229	3881	60	55,8053	0,8812	49,1743	10,8257	18%
2020	230	3882	69	55,7988	1,0134	56,5438	12,4562	18%
2020	231	3883	62	55,7922	0,9105	50,8015	11,1985	18%
2020	232	3884	64	55,7856	0,9399	52,4341	11,5659	18%
2020	233	3885	71	55,7791	1,0427	58,1622	12,8378	18%
2020	234	3886	35	55,7725	0,5140	28,6681	6,3319	18%
2020	235	3887	32	55,7659	0,4700	26,2078	5,7922	18%
2020	236	3888	43	55,7594	0,6315	35,2126	7,7874	18%
2020	237	3889	46	55,7528	0,6756	37,6648	8,3352	18%
2020	238	3890	39	55,7462	0,5728	31,9295	7,0705	18%
2020	239	3891	35	55,7397	0,5140	28,6513	6,3487	18%
2020	240	3892	41	55,7331	0,6021	33,5590	7,4410	18%
2020	241	3893	36	55,7266	0,5287	29,4629	6,5371	18%
2020	242	3894	35	55,7200	0,5140	28,6411	6,3589	18%
2020	243	3895	38	55,7134	0,5581	31,0924	6,9076	18%
2020	244	3896	47	55,7069	0,6903	38,4519	8,5481	18%
2020	245	3897	45	55,7003	0,6609	36,8113	8,1887	18%
2020	246	3898	38	55,6937	0,5581	31,0814	6,9186	18%
2020	247	3899	39	55,6872	0,5728	31,8956	7,1044	18%
2020	248	3900	36	55,6806	0,5287	29,4386	6,5614	18%
2020	249	3901	35	55,6740	0,5140	28,6175	6,3825	18%
2020	250	3902	34	55,6675	0,4993	27,7966	6,2034	18%
2020	251	3903	41	55,6609	0,6021	33,5155	7,4845	18%
2020	252	3904	36	55,6543	0,5287	29,4248	6,5752	18%
2020	253	3905	33	55,6478	0,4846	26,9695	6,0305	18%
2020	254	3906	24	55,6412	0,3525	19,6119	4,3881	18%
2020	255	3907	23	55,6346	0,3378	18,7925	4,2075	18%
2020	256	3908	25	55,6281	0,3672	20,4242	4,5758	18%
2020	257	3909	30	55,6215	0,4406	24,5062	5,4938	18%
2020	258	3910	49	55,6150	0,7196	40,0220	8,9780	18%

AÑO	DIA	PERIODO	HUMEDAD	PRONOSTICO HUMEDAD	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE HUMEDAD CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	259	3911	39	55,6084	0,5728	31,8505	7,1495	18%
2020	260	3912	30	55,6018	0,4406	24,4975	5,5025	18%
2020	261	3913	34	55,5953	0,4993	27,7605	6,2395	18%
2020	262	3914	38	55,5887	0,5581	31,0228	6,9772	18%
2020	263	3915	33	55,5821	0,4846	26,9377	6,0623	18%
2020	264	3916	42	55,5756	0,6168	34,2803	7,7197	18%
2020	265	3917	35	55,5690	0,5140	28,5635	6,4365	18%
2020	266	3918	29	55,5624	0,4259	23,6641	5,3359	18%
2020	267	3919	34	55,5559	0,4993	27,7409	6,2591	18%
2020	268	3920	32	55,5493	0,4700	26,1060	5,8940	18%
2020	269	3921	32	55,5427	0,4700	26,1029	5,8971	18%
2020	270	3922	34	55,5362	0,4993	27,7310	6,2690	18%
2020	271	3923	49	55,5296	0,7196	39,9606	9,0394	18%
2020	272	3924	47	55,5231	0,6903	38,3250	8,6750	18%
2020	273	3925	46	55,5165	0,6756	37,5052	8,4948	18%
2020	274	3926	39	55,5099	0,5728	31,7941	7,2059	18%
2020	275	3927	32	55,5034	0,4700	26,0844	5,9156	18%
2020	276	3928	31	55,4968	0,4553	25,2663	5,7337	18%
2020	277	3929	40	55,4902	0,5875	32,5978	7,4022	19%
2020	278	3930	42	55,4837	0,6168	34,2236	7,7764	19%
2020	279	3931	34	55,4771	0,4993	27,7015	6,2985	19%
2020	280	3932	30	55,4705	0,4406	24,4396	5,5604	19%
2020	281	3933	27	55,4640	0,3965	21,9931	5,0069	19%
2020	282	3934	33	55,4574	0,4846	26,8772	6,1228	19%
2020	283	3935	31	55,4508	0,4553	25,2453	5,7547	19%
2020	284	3936	29	55,4443	0,4259	23,6138	5,3862	19%
2020	285	3937	31	55,4377	0,4553	25,2394	5,7606	19%
2020	286	3938	26	55,4311	0,3818	21,1660	4,8340	19%
2020	287	3939	37	55,4246	0,5434	30,1173	6,8827	19%
2020	288	3940	36	55,4180	0,5287	29,2998	6,7002	19%
2020	289	3941	59	55,4115	0,8665	48,0134	10,9866	19%
2020	290	3942	62	55,4049	0,9105	50,4488	11,5512	19%
2020	291	3943	51	55,3983	0,7490	41,4933	9,5067	19%
2020	292	3944	43	55,3918	0,6315	34,9804	8,0196	19%

AÑO	DIA	PERIODO	HUMEDAD	PRONOSTICO HUMEDAD	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE HUMEDAD CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	293	3945	39	55,3852	0,5728	31,7227	7,2773	19%
2020	294	3946	52	55,3786	0,7637	42,2919	9,7081	19%
2020	295	3947	71	55,3721	1,0427	57,7378	13,2622	19%
2020	296	3948	60	55,3655	0,8812	48,7867	11,2133	19%
2020	297	3949	61	55,3589	0,8959	49,5940	11,4060	19%
2020	298	3950	55	55,3524	0,8077	44,7106	10,2894	19%
2020	299	3951	43	55,3458	0,6315	34,9514	8,0486	19%
2020	300	3952	59	55,3392	0,8665	47,9509	11,0491	19%
2020	301	3953	43	55,3327	0,6315	34,9431	8,0569	19%
2020	302	3954	44	55,3261	0,6462	35,7515	8,2485	19%
2020	303	3955	58	55,3196	0,8518	47,1214	10,8786	19%
2020	304	3956	37	55,3130	0,5434	30,0566	6,9434	19%
2020	305	3957	30	55,3064	0,4406	24,3673	5,6327	19%
2020	306	3958	28	55,2999	0,4112	22,7402	5,2598	19%
2020	307	3959	29	55,2933	0,4259	23,5495	5,4505	19%
2020	308	3960	25	55,2867	0,3672	20,2989	4,7011	19%
2020	309	3961	25	55,2802	0,3672	20,2965	4,7035	19%
2020	310	3962	24	55,2736	0,3525	19,4823	4,5177	19%
2020	311	3963	22	55,2670	0,3231	17,8567	4,1433	19%
2020	312	3964	21	55,2605	0,3084	17,0430	3,9570	19%
2020	313	3965	26	55,2539	0,3818	21,0983	4,9017	19%
2020	314	3966	36	55,2473	0,5287	29,2096	6,7904	19%
2020	315	3967	54	55,2408	0,7931	43,8092	10,1908	19%
2020	316	3968	59	55,2342	0,8665	47,8599	11,1401	19%
2020	317	3969	70	55,2276	1,0280	56,7761	13,2239	19%
2020	318	3970	70	55,2211	1,0280	56,7694	13,2306	19%
2020	319	3971	62	55,2145	0,9105	50,2755	11,7245	19%
2020	320	3972	60	55,2080	0,8812	48,6479	11,3521	19%
2020	321	3973	67	55,2014	0,9840	54,3170	12,6830	19%
2020	322	3974	66	55,1948	0,9693	53,5000	12,5000	19%
2020	323	3975	76	55,1883	1,1162	61,5987	14,4013	19%
2020	324	3976	42	55,1817	0,6168	34,0373	7,9627	19%
2020	325	3977	36	55,1751	0,5287	29,1714	6,8286	19%
2020	326	3978	33	55,1686	0,4846	26,7373	6,2627	19%

AÑO	DIA	PERIODO	HUMEDAD	PRONOSTICO HUMEDAD	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE HUMEDAD CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	327	3979	32	55,1620	0,4700	25,9240	6,0760	19%
2020	328	3980	29	55,1554	0,4259	23,4908	5,5092	19%
2020	329	3981	33	55,1489	0,4846	26,7277	6,2723	19%
2020	330	3982	35	55,1423	0,5140	28,3442	6,6558	19%
2020	331	3983	43	55,1357	0,6315	34,8187	8,1813	19%
2020	332	3984	56	55,1292	0,8224	45,3399	10,6601	19%
2020	333	3985	59	55,1226	0,8665	47,7632	11,2368	19%
2020	334	3986	49	55,1161	0,7196	39,6630	9,3370	19%
2020	335	3987	47	55,1095	0,6903	38,0396	8,9604	19%
2020	336	3988	61	55,1029	0,8959	49,3646	11,6354	19%
2020	337	3989	49	55,0964	0,7196	39,6488	9,3512	19%
2020	338	3990	65	55,0898	0,9546	52,5891	12,4109	19%
2020	339	3991	76	55,0832	1,1162	61,4815	14,5185	19%
2020	340	3992	77	55,0767	1,1308	62,2830	14,7170	19%
2020	341	3993	49	55,0701	0,7196	39,6299	9,3701	19%
2020	342	3994	43	55,0635	0,6315	34,7731	8,2269	19%
2020	343	3995	45	55,0570	0,6609	36,3862	8,6138	19%
2020	344	3996	68	55,0504	0,9987	54,9770	13,0230	19%
2020	345	3997	64	55,0438	0,9399	51,7369	12,2631	19%
2020	346	3998	79	55,0373	1,1602	63,8551	15,1449	19%
2020	347	3999	68	55,0307	0,9987	54,9573	13,0427	19%
2020	348	4000	67	55,0241	0,9840	54,1426	12,8574	19%
2020	349	4001	75	55,0176	1,1015	60,6002	14,3998	19%
2020	350	4002	74	55,0110	1,0868	59,7851	14,2149	19%
2020	351	4003	62	55,0045	0,9105	50,0842	11,9158	19%
2020	352	4004	60	54,9979	0,8812	48,4628	11,5372	19%
2020	353	4005	53	54,9913	0,7784	42,8037	10,1963	19%
2020	354	4006	48	54,9848	0,7049	38,7610	9,2390	19%
2020	355	4007	58	54,9782	0,8518	46,8306	11,1694	19%
2020	356	4008	47	54,9716	0,6903	37,9444	9,0556	19%
2020	357	4009	38	54,9651	0,5581	30,6748	7,3252	19%
2020	358	4010	44	54,9585	0,6462	35,5139	8,4861	19%
2020	359	4011	53	54,9519	0,7784	42,7730	10,2270	19%
2020	360	4012	65	54,9454	0,9546	52,4512	12,5488	19%

AÑO	DIA	PERIODO	HUMEDAD	PRONOSTICO HUMEDAD	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE HUMEDAD CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	361	4013	71	54,9388	1,0427	57,2861	13,7139	19%
2020	362	4014	45	54,9322	0,6609	36,3037	8,6963	19%
2020	363	4015	73	54,9257	1,0721	58,8857	14,1143	19%
2020	364	4016	73	54,9191	1,0721	58,8786	14,1214	19%
2020	365	4017	65	54,9126	0,9546	52,4199	12,5801	19%
2020	366	4018	60	54,9060	0,8812	48,3818	11,6182	19%
						<b>ERROR (DAM) Y (PEMA)</b>	<b>6,5152</b>	<b>10%</b>

### 6.3. Análisis de presión.

AÑO	DIA	PERIODO	PRESIÓN	PRONOSTICO PRESIÓN	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE PRESIÓN CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	1	3653	776,478	779,1068	0,9965	776,4184	0,0596	0,01%
2020	2	3654	777,24	779,1067	0,9975	777,1803	0,0597	0,01%
2020	3	3655	778,002	779,1067	0,9985	777,9422	0,0598	0,01%
2020	4	3656	777,24	779,1067	0,9975	777,1803	0,0597	0,01%
2020	5	3657	774,192	779,1066	0,9936	774,1325	0,0595	0,01%
2020	6	3658	771,652	779,1066	0,9904	771,5926	0,0594	0,01%
2020	7	3659	776,478	779,1066	0,9965	776,4182	0,0598	0,01%
2020	8	3660	774,954	779,1065	0,9946	774,8943	0,0597	0,01%
2020	9	3661	774,192	779,1065	0,9936	774,1323	0,0597	0,01%
2020	10	3662	774,954	779,1065	0,9946	774,8942	0,0598	0,01%
2020	11	3663	775,716	779,1064	0,9956	775,6561	0,0599	0,01%
2020	12	3664	775,716	779,1064	0,9956	775,6561	0,0599	0,01%
2020	13	3665	775,716	779,1063	0,9956	775,6561	0,0599	0,01%
2020	14	3666	775,716	779,1063	0,9956	775,6560	0,0600	0,01%
2020	15	3667	775,716	779,1063	0,9956	775,6560	0,0600	0,01%
2020	16	3668	778,002	779,1062	0,9985	777,9418	0,0602	0,01%
2020	17	3669	779,526	779,1062	1,0005	779,4656	0,0604	0,01%
2020	18	3670	778,764	779,1062	0,9995	778,7036	0,0604	0,01%

AÑO	DIA	PERIODO	PRESIÓN	PRONOSTICO PRESIÓN	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE PRESIÓN CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	19	3671	777,24	779,1061	0,9975	777,1797	0,0603	0,01%
2020	20	3672	776,478	779,1061	0,9965	776,4177	0,0603	0,01%
2020	21	3673	774,192	779,1061	0,9936	774,1319	0,0601	0,01%
2020	22	3674	774,954	779,1060	0,9946	774,8938	0,0602	0,01%
2020	23	3675	775,716	779,1060	0,9956	775,6557	0,0603	0,01%
2020	24	3676	776,478	779,1059	0,9965	776,4176	0,0604	0,01%
2020	25	3677	776,478	779,1059	0,9965	776,4176	0,0604	0,01%
2020	26	3678	775,716	779,1059	0,9956	775,6556	0,0604	0,01%
2020	27	3679	776,478	779,1058	0,9965	776,4175	0,0605	0,01%
2020	28	3680	776,478	779,1058	0,9965	776,4175	0,0605	0,01%
2020	29	3681	774,954	779,1058	0,9946	774,8935	0,0605	0,01%
2020	30	3682	778,002	779,1057	0,9985	777,9413	0,0607	0,01%
2020	31	3683	780,288	779,1057	1,0014	780,2270	0,0610	0,01%
2020	32	3684	778,002	779,1057	0,9985	777,9412	0,0608	0,01%
2020	33	3685	777,24	779,1056	0,9975	777,1792	0,0608	0,01%
2020	34	3686	778,002	779,1056	0,9985	777,9411	0,0609	0,01%
2020	35	3687	775,716	779,1055	0,9956	775,6553	0,0607	0,01%
2020	36	3688	774,192	779,1055	0,9936	774,1313	0,0607	0,01%
2020	37	3689	775,716	779,1055	0,9956	775,6552	0,0608	0,01%
2020	38	3690	776,478	779,1054	0,9965	776,4171	0,0609	0,01%
2020	39	3691	776,478	779,1054	0,9965	776,4171	0,0609	0,01%
2020	40	3692	777,24	779,1054	0,9975	777,1790	0,0610	0,01%
2020	41	3693	778,764	779,1053	0,9995	778,7028	0,0612	0,01%
2020	42	3694	779,526	779,1053	1,0005	779,4647	0,0613	0,01%
2020	43	3695	777,24	779,1053	0,9975	777,1789	0,0611	0,01%
2020	44	3696	776,478	779,1052	0,9965	776,4169	0,0611	0,01%
2020	45	3697	776,478	779,1052	0,9965	776,4168	0,0612	0,01%
2020	46	3698	775,716	779,1051	0,9956	775,6549	0,0611	0,01%
2020	47	3699	774,192	779,1051	0,9936	774,1309	0,0611	0,01%
2020	48	3700	773,43	779,1051	0,9926	773,3690	0,0610	0,01%
2020	49	3701	775,716	779,1050	0,9956	775,6548	0,0612	0,01%
2020	50	3702	776,478	779,1050	0,9965	776,4167	0,0613	0,01%
2020	51	3703	776,478	779,1050	0,9965	776,4166	0,0614	0,01%
2020	52	3704	780,288	779,1049	1,0014	780,2263	0,0617	0,01%
2020	53	3705	781,812	779,1049	1,0034	781,7501	0,0619	0,01%
2020	54	3706	781,05	779,1049	1,0024	780,9882	0,0618	0,01%

AÑO	DIA	PERIODO	PRESIÓN	PRONOSTICO PRESIÓN	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE PRESIÓN CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	55	3707	777,24	779,1048	0,9975	777,1784	0,0616	0,01%
2020	56	3708	774,954	779,1048	0,9946	774,8926	0,0614	0,01%
2020	57	3709	779,526	779,1047	1,0005	779,4642	0,0618	0,01%
2020	58	3710	778,764	779,1047	0,9995	778,7022	0,0618	0,01%
2020	59	3711	778,002	779,1047	0,9985	777,9402	0,0618	0,01%
2020	60	3712	780,288	779,1046	1,0014	780,2260	0,0620	0,01%
2020	61	3713	780,288	779,1046	1,0014	780,2260	0,0620	0,01%
2020	62	3714	779,526	779,1046	1,0005	779,4640	0,0620	0,01%
2020	63	3715	778,764	779,1045	0,9995	778,7020	0,0620	0,01%
2020	64	3716	779,526	779,1045	1,0005	779,4639	0,0621	0,01%
2020	65	3717	779,526	779,1045	1,0005	779,4639	0,0621	0,01%
2020	66	3718	778,764	779,1044	0,9995	778,7019	0,0621	0,01%
2020	67	3719	776,478	779,1044	0,9965	776,4160	0,0620	0,01%
2020	68	3720	775,716	779,1043	0,9956	775,6541	0,0619	0,01%
2020	69	3721	777,24	779,1043	0,9975	777,1779	0,0621	0,01%
2020	70	3722	778,764	779,1043	0,9995	778,7018	0,0622	0,01%
2020	71	3723	776,478	779,1042	0,9965	776,4159	0,0621	0,01%
2020	72	3724	775,716	779,1042	0,9956	775,6539	0,0621	0,01%
2020	73	3725	777,24	779,1042	0,9975	777,1778	0,0622	0,01%
2020	74	3726	777,24	779,1041	0,9975	777,1777	0,0623	0,01%
2020	75	3727	777,24	779,1041	0,9975	777,1777	0,0623	0,01%
2020	76	3728	777,24	779,1041	0,9975	777,1777	0,0623	0,01%
2020	77	3729	776,478	779,1040	0,9965	776,4157	0,0623	0,01%
2020	78	3730	777,24	779,1040	0,9975	777,1776	0,0624	0,01%
2020	79	3731	777,24	779,1039	0,9975	777,1775	0,0625	0,01%
2020	80	3732	778,764	779,1039	0,9995	778,7014	0,0626	0,01%
2020	81	3733	778,002	779,1039	0,9985	777,9394	0,0626	0,01%
2020	82	3734	778,002	779,1038	0,9985	777,9394	0,0626	0,01%
2020	83	3735	778,764	779,1038	0,9995	778,7013	0,0627	0,01%
2020	84	3736	778,002	779,1038	0,9985	777,9393	0,0627	0,01%
2020	85	3737	776,478	779,1037	0,9965	776,4154	0,0626	0,01%
2020	86	3738	777,24	779,1037	0,9975	777,1773	0,0627	0,01%
2020	87	3739	777,24	779,1037	0,9975	777,1773	0,0627	0,01%
2020	88	3740	776,478	779,1036	0,9965	776,4153	0,0627	0,01%
2020	89	3741	778,764	779,1036	0,9995	778,7011	0,0629	0,01%
2020	90	3742	778,764	779,1035	0,9995	778,7010	0,0630	0,01%

AÑO	DIA	PERIODO	PRESIÓN	PRONOSTICO PRESIÓN	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE PRESIÓN CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	91	3743	778,002	779,1035	0,9985	777,9390	0,0630	0,01%
2020	92	3744	778,002	779,1035	0,9985	777,9390	0,0630	0,01%
2020	93	3745	779,526	779,1034	1,0005	779,4629	0,0631	0,01%
2020	94	3746	781,05	779,1034	1,0024	780,9867	0,0633	0,01%
2020	95	3747	777,24	779,1034	0,9975	777,1770	0,0630	0,01%
2020	96	3748	775,716	779,1033	0,9956	775,6531	0,0629	0,01%
2020	97	3749	779,526	779,1033	1,0005	779,4627	0,0633	0,01%
2020	98	3750	782,574	779,1033	1,0044	782,5104	0,0636	0,01%
2020	99	3751	781,812	779,1032	1,0034	781,7484	0,0636	0,01%
2020	100	3752	781,812	779,1032	1,0034	781,7484	0,0636	0,01%
2020	101	3753	781,812	779,1031	1,0034	781,7484	0,0636	0,01%
2020	102	3754	780,288	779,1031	1,0014	780,2245	0,0635	0,01%
2020	103	3755	778,764	779,1031	0,9995	778,7006	0,0634	0,01%
2020	104	3756	776,478	779,1030	0,9965	776,4147	0,0633	0,01%
2020	105	3757	780,288	779,1030	1,0014	780,2244	0,0636	0,01%
2020	106	3758	781,812	779,1030	1,0034	781,7482	0,0638	0,01%
2020	107	3759	784,098	779,1029	1,0063	784,0340	0,0640	0,01%
2020	108	3760	785,622	779,1029	1,0083	785,5578	0,0642	0,01%
2020	109	3761	784,098	779,1029	1,0063	784,0339	0,0641	0,01%
2020	110	3762	781,812	779,1028	1,0034	781,7480	0,0640	0,01%
2020	111	3763	781,05	779,1028	1,0024	780,9861	0,0639	0,01%
2020	112	3764	780,288	779,1027	1,0014	780,2241	0,0639	0,01%
2020	113	3765	779,526	779,1027	1,0005	779,4621	0,0639	0,01%
2020	114	3766	778,764	779,1027	0,9995	778,7002	0,0638	0,01%
2020	115	3767	776,478	779,1026	0,9965	776,4143	0,0637	0,01%
2020	116	3768	777,24	779,1026	0,9975	777,1762	0,0638	0,01%
2020	117	3769	780,288	779,1026	1,0014	780,2239	0,0641	0,01%
2020	118	3770	780,288	779,1025	1,0014	780,2239	0,0641	0,01%
2020	119	3771	778,764	779,1025	0,9995	778,7000	0,0640	0,01%
2020	120	3772	781,05	779,1025	1,0024	780,9857	0,0643	0,01%
2020	121	3773	781,05	779,1024	1,0024	780,9857	0,0643	0,01%
2020	122	3774	781,812	779,1024	1,0034	781,7476	0,0644	0,01%
2020	123	3775	782,574	779,1023	1,0044	782,5095	0,0645	0,01%
2020	124	3776	779,526	779,1023	1,0005	779,4617	0,0643	0,01%
2020	125	3777	776,478	779,1023	0,9965	776,4139	0,0641	0,01%
2020	126	3778	777,24	779,1022	0,9975	777,1758	0,0642	0,01%

AÑO	DIA	PERIODO	PRESIÓN	PRONOSTICO PRESIÓN	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE PRESIÓN CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	127	3779	784,86	779,1022	1,0073	784,7952	0,0648	0,01%
2020	128	3780	786,384	779,1022	1,0093	786,3190	0,0650	0,01%
2020	129	3781	784,86	779,1021	1,0073	784,7951	0,0649	0,01%
2020	130	3782	781,812	779,1021	1,0034	781,7473	0,0647	0,01%
2020	131	3783	777,24	779,1021	0,9975	777,1757	0,0643	0,01%
2020	132	3784	776,478	779,1020	0,9965	776,4137	0,0643	0,01%
2020	133	3785	778,002	779,1020	0,9985	777,9375	0,0645	0,01%
2020	134	3786	781,05	779,1019	1,0024	780,9852	0,0648	0,01%
2020	135	3787	784,098	779,1019	1,0063	784,0329	0,0651	0,01%
2020	136	3788	784,86	779,1019	1,0073	784,7948	0,0652	0,01%
2020	137	3789	784,098	779,1018	1,0063	784,0329	0,0651	0,01%
2020	138	3790	781,812	779,1018	1,0034	781,7470	0,0650	0,01%
2020	139	3791	781,812	779,1018	1,0034	781,7470	0,0650	0,01%
2020	140	3792	779,526	779,1017	1,0005	779,4611	0,0649	0,01%
2020	141	3793	777,24	779,1017	0,9975	777,1753	0,0647	0,01%
2020	142	3794	777,24	779,1017	0,9975	777,1753	0,0647	0,01%
2020	143	3795	781,812	779,1016	1,0034	781,7468	0,0652	0,01%
2020	144	3796	787,908	779,1016	1,0112	787,8423	0,0657	0,01%
2020	145	3797	785,622	779,1015	1,0083	785,5565	0,0655	0,01%
2020	146	3798	784,098	779,1015	1,0063	784,0325	0,0655	0,01%
2020	147	3799	784,098	779,1015	1,0063	784,0325	0,0655	0,01%
2020	148	3800	781,812	779,1014	1,0034	781,7467	0,0653	0,01%
2020	149	3801	778,764	779,1014	0,9995	778,6989	0,0651	0,01%
2020	150	3802	778,764	779,1014	0,9995	778,6988	0,0652	0,01%
2020	151	3803	778,764	779,1013	0,9995	778,6988	0,0652	0,01%
2020	152	3804	781,812	779,1013	1,0034	781,7465	0,0655	0,01%
2020	153	3805	784,098	779,1013	1,0063	784,0323	0,0657	0,01%
2020	154	3806	784,098	779,1012	1,0063	784,0322	0,0658	0,01%
2020	155	3807	780,288	779,1012	1,0014	780,2225	0,0655	0,01%
2020	156	3808	781,812	779,1011	1,0034	781,7464	0,0656	0,01%
2020	157	3809	783,336	779,1011	1,0054	783,2702	0,0658	0,01%
2020	158	3810	782,574	779,1011	1,0044	782,5082	0,0658	0,01%
2020	159	3811	779,526	779,1010	1,0005	779,4605	0,0655	0,01%
2020	160	3812	778,764	779,1010	0,9995	778,6985	0,0655	0,01%
2020	161	3813	777,24	779,1010	0,9975	777,1746	0,0654	0,01%
2020	162	3814	777,24	779,1009	0,9975	777,1745	0,0655	0,01%

AÑO	DIA	PERIODO	PRESIÓN	PRONOSTICO PRESIÓN	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE PRESIÓN CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	163	3815	777,24	779,1009	0,9975	777,1745	0,0655	0,01%
2020	164	3816	775,716	779,1009	0,9956	775,6506	0,0654	0,01%
2020	165	3817	781,812	779,1008	1,0034	781,7460	0,0660	0,01%
2020	166	3818	784,86	779,1008	1,0073	784,7937	0,0663	0,01%
2020	167	3819	781,812	779,1007	1,0034	781,7460	0,0660	0,01%
2020	168	3820	780,288	779,1007	1,0014	780,2221	0,0659	0,01%
2020	169	3821	778,002	779,1007	0,9985	777,9362	0,0658	0,01%
2020	170	3822	777,24	779,1006	0,9975	777,1742	0,0658	0,01%
2020	171	3823	778,002	779,1006	0,9985	777,9361	0,0659	0,01%
2020	172	3824	778,002	779,1006	0,9985	777,9361	0,0659	0,01%
2020	173	3825	778,002	779,1005	0,9985	777,9361	0,0659	0,01%
2020	174	3826	778,764	779,1005	0,9995	778,6980	0,0660	0,01%
2020	175	3827	774,954	779,1005	0,9946	774,8883	0,0657	0,01%
2020	176	3828	773,43	779,1004	0,9926	773,3644	0,0656	0,01%
2020	177	3829	778,764	779,1004	0,9995	778,6979	0,0661	0,01%
2020	178	3830	781,812	779,1003	1,0034	781,7456	0,0664	0,01%
2020	179	3831	782,574	779,1003	1,0044	782,5075	0,0665	0,01%
2020	180	3832	781,812	779,1003	1,0034	781,7455	0,0665	0,01%
2020	181	3833	777,24	779,1002	0,9975	777,1738	0,0662	0,01%
2020	182	3834	776,478	779,1002	0,9965	776,4119	0,0661	0,01%
2020	183	3835	783,336	779,1002	1,0054	783,2693	0,0667	0,01%
2020	184	3836	782,574	779,1001	1,0044	782,5073	0,0667	0,01%
2020	185	3837	782,574	779,1001	1,0044	782,5072	0,0668	0,01%
2020	186	3838	777,24	779,1001	0,9975	777,1737	0,0663	0,01%
2020	187	3839	777,24	779,1000	0,9975	777,1736	0,0664	0,01%
2020	188	3840	778,764	779,1000	0,9995	778,6975	0,0665	0,01%
2020	189	3841	777,24	779,0999	0,9975	777,1736	0,0664	0,01%
2020	190	3842	781,812	779,0999	1,0034	781,7451	0,0669	0,01%
2020	191	3843	784,098	779,0999	1,0063	784,0309	0,0671	0,01%
2020	192	3844	781,05	779,0998	1,0024	780,9831	0,0669	0,01%
2020	193	3845	777,24	779,0998	0,9975	777,1734	0,0666	0,01%
2020	194	3846	777,24	779,0998	0,9975	777,1734	0,0666	0,01%
2020	195	3847	779,526	779,0997	1,0005	779,4591	0,0669	0,01%
2020	196	3848	784,098	779,0997	1,0063	784,0307	0,0673	0,01%
2020	197	3849	781,05	779,0997	1,0024	780,9829	0,0671	0,01%
2020	198	3850	779,526	779,0996	1,0005	779,4590	0,0670	0,01%

AÑO	DIA	PERIODO	PRESIÓN	PRONOSTICO PRESIÓN	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE PRESIÓN CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	199	3851	778,764	779,0996	0,9995	778,6971	0,0669	0,01%
2020	200	3852	777,24	779,0995	0,9975	777,1732	0,0668	0,01%
2020	201	3853	776,478	779,0995	0,9965	776,4112	0,0668	0,01%
2020	202	3854	776,478	779,0995	0,9965	776,4111	0,0669	0,01%
2020	203	3855	776,478	779,0994	0,9965	776,4111	0,0669	0,01%
2020	204	3856	775,716	779,0994	0,9956	775,6491	0,0669	0,01%
2020	205	3857	777,24	779,0994	0,9975	777,1730	0,0670	0,01%
2020	206	3858	780,288	779,0993	1,0014	780,2207	0,0673	0,01%
2020	207	3859	785,622	779,0993	1,0083	785,5542	0,0678	0,01%
2020	208	3860	781,812	779,0993	1,0034	781,7445	0,0675	0,01%
2020	209	3861	779,526	779,0992	1,0005	779,4586	0,0674	0,01%
2020	210	3862	781,812	779,0992	1,0034	781,7444	0,0676	0,01%
2020	211	3863	785,622	779,0991	1,0083	785,5540	0,0680	0,01%
2020	212	3864	784,098	779,0991	1,0063	784,0301	0,0679	0,01%
2020	213	3865	782,574	779,0991	1,0044	782,5062	0,0678	0,01%
2020	214	3866	782,574	779,0990	1,0044	782,5062	0,0678	0,01%
2020	215	3867	781,812	779,0990	1,0034	781,7442	0,0678	0,01%
2020	216	3868	783,336	779,0990	1,0054	783,2680	0,0680	0,01%
2020	217	3869	781,812	779,0989	1,0034	781,7441	0,0679	0,01%
2020	218	3870	780,288	779,0989	1,0014	780,2202	0,0678	0,01%
2020	219	3871	780,288	779,0989	1,0014	780,2202	0,0678	0,01%
2020	220	3872	781,812	779,0988	1,0034	781,7440	0,0680	0,01%
2020	221	3873	781,812	779,0988	1,0034	781,7440	0,0680	0,01%
2020	222	3874	779,526	779,0987	1,0005	779,4582	0,0678	0,01%
2020	223	3875	775,716	779,0987	0,9956	775,6485	0,0675	0,01%
2020	224	3876	778,002	779,0987	0,9985	777,9342	0,0678	0,01%
2020	225	3877	777,24	779,0986	0,9975	777,1722	0,0678	0,01%
2020	226	3878	774,954	779,0986	0,9946	774,8864	0,0676	0,01%
2020	227	3879	773,43	779,0986	0,9926	773,3625	0,0675	0,01%
2020	228	3880	774,192	779,0985	0,9936	774,1244	0,0676	0,01%
2020	229	3881	778,002	779,0985	0,9985	777,9340	0,0680	0,01%
2020	230	3882	777,24	779,0985	0,9975	777,1721	0,0679	0,01%
2020	231	3883	773,43	779,0984	0,9926	773,3624	0,0676	0,01%
2020	232	3884	776,478	779,0984	0,9965	776,4101	0,0679	0,01%
2020	233	3885	789,432	779,0983	1,0132	789,3629	0,0691	0,01%
2020	234	3886	790,194	779,0983	1,0142	790,1248	0,0692	0,01%

AÑO	DIA	PERIODO	PRESIÓN	PRONOSTICO PRESIÓN	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE PRESIÓN CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	235	3887	785,622	779,0983	1,0083	785,5532	0,0688	0,01%
2020	236	3888	781,05	779,0982	1,0024	780,9815	0,0685	0,01%
2020	237	3889	777,24	779,0982	0,9975	777,1718	0,0682	0,01%
2020	238	3890	774,954	779,0982	0,9946	774,8860	0,0680	0,01%
2020	239	3891	774,192	779,0981	0,9936	774,1240	0,0680	0,01%
2020	240	3892	777,24	779,0981	0,9975	777,1717	0,0683	0,01%
2020	241	3893	776,478	779,0981	0,9965	776,4097	0,0683	0,01%
2020	242	3894	774,192	779,0980	0,9936	774,1239	0,0681	0,01%
2020	243	3895	777,24	779,0980	0,9975	777,1716	0,0684	0,01%
2020	244	3896	781,05	779,0979	1,0024	780,9812	0,0688	0,01%
2020	245	3897	782,574	779,0979	1,0044	782,5051	0,0689	0,01%
2020	246	3898	781,812	779,0979	1,0034	781,7431	0,0689	0,01%
2020	247	3899	778,002	779,0978	0,9985	777,9334	0,0686	0,01%
2020	248	3900	778,002	779,0978	0,9985	777,9333	0,0687	0,01%
2020	249	3901	776,478	779,0978	0,9965	776,4094	0,0686	0,01%
2020	250	3902	775,716	779,0977	0,9956	775,6475	0,0685	0,01%
2020	251	3903	779,526	779,0977	1,0005	779,4571	0,0689	0,01%
2020	252	3904	778,764	779,0977	0,9995	778,6951	0,0689	0,01%
2020	253	3905	775,716	779,0976	0,9956	775,6474	0,0686	0,01%
2020	254	3906	777,24	779,0976	0,9975	777,1712	0,0688	0,01%
2020	255	3907	773,43	779,0975	0,9926	773,3615	0,0685	0,01%
2020	256	3908	774,954	779,0975	0,9946	774,8853	0,0687	0,01%
2020	257	3909	775,716	779,0975	0,9956	775,6472	0,0688	0,01%
2020	258	3910	781,812	779,0974	1,0034	781,7426	0,0694	0,01%
2020	259	3911	780,288	779,0974	1,0014	780,2187	0,0693	0,01%
2020	260	3912	774,954	779,0974	0,9946	774,8852	0,0688	0,01%
2020	261	3913	777,24	779,0973	0,9975	777,1709	0,0691	0,01%
2020	262	3914	778,002	779,0973	0,9985	777,9328	0,0692	0,01%
2020	263	3915	777,24	779,0973	0,9975	777,1709	0,0691	0,01%
2020	264	3916	781,812	779,0972	1,0034	781,7424	0,0696	0,01%
2020	265	3917	782,574	779,0972	1,0044	782,5043	0,0697	0,01%
2020	266	3918	781,812	779,0971	1,0034	781,7424	0,0696	0,01%
2020	267	3919	780,288	779,0971	1,0014	780,2185	0,0695	0,01%
2020	268	3920	778,764	779,0971	0,9995	778,6946	0,0694	0,01%
2020	269	3921	775,716	779,0970	0,9956	775,6468	0,0692	0,01%
2020	270	3922	772,668	779,0970	0,9917	772,5990	0,0690	0,01%

AÑO	DIA	PERIODO	PRESIÓN	PRONOSTICO PRESIÓN	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE PRESIÓN CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	271	3923	774,954	779,0970	0,9946	774,8848	0,0692	0,01%
2020	272	3924	779,526	779,0969	1,0005	779,4563	0,0697	0,01%
2020	273	3925	776,478	779,0969	0,9965	776,4086	0,0694	0,01%
2020	274	3926	774,954	779,0969	0,9946	774,8847	0,0693	0,01%
2020	275	3927	773,43	779,0968	0,9926	773,3608	0,0692	0,01%
2020	276	3928	774,954	779,0968	0,9946	774,8846	0,0694	0,01%
2020	277	3929	778,002	779,0967	0,9985	777,9323	0,0697	0,01%
2020	278	3930	778,002	779,0967	0,9985	777,9323	0,0697	0,01%
2020	279	3931	777,24	779,0967	0,9975	777,1703	0,0697	0,01%
2020	280	3932	775,716	779,0966	0,9956	775,6464	0,0696	0,01%
2020	281	3933	775,716	779,0966	0,9956	775,6464	0,0696	0,01%
2020	282	3934	776,478	779,0966	0,9965	776,4082	0,0698	0,01%
2020	283	3935	774,954	779,0965	0,9946	774,8844	0,0696	0,01%
2020	284	3936	777,24	779,0965	0,9975	777,1701	0,0699	0,01%
2020	285	3937	777,24	779,0965	0,9975	777,1701	0,0699	0,01%
2020	286	3938	775,716	779,0964	0,9956	775,6462	0,0698	0,01%
2020	287	3939	775,716	779,0964	0,9956	775,6461	0,0699	0,01%
2020	288	3940	774,192	779,0963	0,9936	774,1222	0,0698	0,01%
2020	289	3941	778,002	779,0963	0,9985	777,9319	0,0701	0,01%
2020	290	3942	780,288	779,0963	1,0014	780,2176	0,0704	0,01%
2020	291	3943	777,24	779,0962	0,9975	777,1699	0,0701	0,01%
2020	292	3944	774,954	779,0962	0,9946	774,8840	0,0700	0,01%
2020	293	3945	773,43	779,0962	0,9926	773,3601	0,0699	0,01%
2020	294	3946	775,716	779,0961	0,9956	775,6459	0,0701	0,01%
2020	295	3947	779,526	779,0961	1,0005	779,4555	0,0705	0,01%
2020	296	3948	778,002	779,0961	0,9985	777,9316	0,0704	0,01%
2020	297	3949	775,716	779,0960	0,9956	775,6458	0,0702	0,01%
2020	298	3950	774,192	779,0960	0,9936	774,1219	0,0701	0,01%
2020	299	3951	771,652	779,0959	0,9904	771,5821	0,0699	0,01%
2020	300	3952	775,716	779,0959	0,9956	775,6457	0,0703	0,01%
2020	301	3953	774,954	779,0959	0,9946	774,8837	0,0703	0,01%
2020	302	3954	770,128	779,0958	0,9884	770,0581	0,0699	0,01%
2020	303	3955	776,478	779,0958	0,9965	776,4075	0,0705	0,01%
2020	304	3956	781,812	779,0958	1,0034	781,7410	0,0710	0,01%
2020	305	3957	781,812	779,0957	1,0034	781,7409	0,0711	0,01%
2020	306	3958	781,05	779,0957	1,0024	780,9790	0,0710	0,01%

AÑO	DIA	PERIODO	PRESIÓN	PRONOSTICO PRESIÓN	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE PRESIÓN CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	307	3959	778,764	779,0957	0,9995	778,6931	0,0709	0,01%
2020	308	3960	778,002	779,0956	0,9985	777,9312	0,0708	0,01%
2020	309	3961	778,002	779,0956	0,9985	777,9311	0,0709	0,01%
2020	310	3962	775,716	779,0955	0,9956	775,6453	0,0707	0,01%
2020	311	3963	774,954	779,0955	0,9946	774,8833	0,0707	0,01%
2020	312	3964	776,478	779,0955	0,9965	776,4072	0,0708	0,01%
2020	313	3965	776,478	779,0954	0,9965	776,4071	0,0709	0,01%
2020	314	3966	775,716	779,0954	0,9956	775,6452	0,0708	0,01%
2020	315	3967	776,478	779,0954	0,9965	776,4071	0,0709	0,01%
2020	316	3968	777,24	779,0953	0,9975	777,1689	0,0711	0,01%
2020	317	3969	777,24	779,0953	0,9975	777,1689	0,0711	0,01%
2020	318	3970	776,478	779,0953	0,9965	776,4069	0,0711	0,01%
2020	319	3971	773,43	779,0952	0,9926	773,3592	0,0708	0,01%
2020	320	3972	774,954	779,0952	0,9946	774,8830	0,0710	0,01%
2020	321	3973	777,24	779,0951	0,9975	777,1688	0,0712	0,01%
2020	322	3974	775,716	779,0951	0,9956	775,6449	0,0711	0,01%
2020	323	3975	777,24	779,0951	0,9975	777,1687	0,0713	0,01%
2020	324	3976	780,288	779,0950	1,0014	780,2164	0,0716	0,01%
2020	325	3977	778,764	779,0950	0,9995	778,6925	0,0715	0,01%
2020	326	3978	776,478	779,0950	0,9965	776,4067	0,0713	0,01%
2020	327	3979	778,002	779,0949	0,9985	777,9305	0,0715	0,01%
2020	328	3980	776,478	779,0949	0,9965	776,4066	0,0714	0,01%
2020	329	3981	774,954	779,0949	0,9946	774,8827	0,0713	0,01%
2020	330	3982	774,192	779,0948	0,9936	774,1207	0,0713	0,01%
2020	331	3983	774,192	779,0948	0,9936	774,1207	0,0713	0,01%
2020	332	3984	776,478	779,0947	0,9965	776,4064	0,0716	0,01%
2020	333	3985	776,478	779,0947	0,9965	776,4064	0,0716	0,01%
2020	334	3986	776,478	779,0947	0,9965	776,4064	0,0716	0,01%
2020	335	3987	775,716	779,0946	0,9956	775,6444	0,0716	0,01%
2020	336	3988	777,24	779,0946	0,9975	777,1682	0,0718	0,01%
2020	337	3989	773,43	779,0946	0,9926	773,3585	0,0715	0,01%
2020	338	3990	775,716	779,0945	0,9956	775,6443	0,0717	0,01%
2020	339	3991	777,24	779,0945	0,9975	777,1681	0,0719	0,01%
2020	340	3992	782,574	779,0945	1,0044	782,5016	0,0724	0,01%
2020	341	3993	781,05	779,0944	1,0024	780,9777	0,0723	0,01%
2020	342	3994	779,526	779,0944	1,0005	779,4538	0,0722	0,01%

AÑO	DIA	PERIODO	PRESIÓN	PRONOSTICO PRESIÓN	ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD	PRONOSTICO DE PRESIÓN CON ESTACIONALIDAD	ERROR (DAM)	ERROR (PEMA)%
2020	343	3995	778,002	779,0943	0,9985	777,9299	0,0721	0,01%
2020	344	3996	778,764	779,0943	0,9995	778,6918	0,0722	0,01%
2020	345	3997	777,24	779,0943	0,9975	777,1679	0,0721	0,01%
2020	346	3998	774,954	779,0942	0,9946	774,8821	0,0719	0,01%
2020	347	3999	774,954	779,0942	0,9946	774,8820	0,0720	0,01%
2020	348	4000	774,954	779,0942	0,9946	774,8820	0,0720	0,01%
2020	349	4001	777,24	779,0941	0,9975	777,1678	0,0722	0,01%
2020	350	4002	774,192	779,0941	0,9936	774,1200	0,0720	0,01%
2020	351	4003	776,478	779,0941	0,9965	776,4057	0,0723	0,01%
2020	352	4004	776,478	779,0940	0,9965	776,4057	0,0723	0,01%
2020	353	4005	774,192	779,0940	0,9936	774,1199	0,0721	0,01%
2020	354	4006	770,89	779,0939	0,9894	770,8182	0,0718	0,01%
2020	355	4007	774,954	779,0939	0,9946	774,8817	0,0723	0,01%
2020	356	4008	778,764	779,0939	0,9995	778,6914	0,0726	0,01%
2020	357	4009	778,002	779,0938	0,9985	777,9294	0,0726	0,01%
2020	358	4010	775,716	779,0938	0,9956	775,6436	0,0724	0,01%
2020	359	4011	774,954	779,0938	0,9946	774,8816	0,0724	0,01%
2020	360	4012	774,192	779,0937	0,9936	774,1196	0,0724	0,01%
2020	361	4013	774,954	779,0937	0,9946	774,8815	0,0725	0,01%
2020	362	4014	775,716	779,0937	0,9956	775,6434	0,0726	0,01%
2020	363	4015	777,24	779,0936	0,9975	777,1672	0,0728	0,01%
2020	364	4016	776,478	779,0936	0,9965	776,4053	0,0727	0,01%
2020	365	4017	774,192	779,0935	0,9936	774,1195	0,0725	0,01%
2020	366	4018	777,24	779,0935	0,9975	777,1671	0,0729	0,01%
						<b>ERROR (DAM) Y (PEMA)</b>	<b>0,0365</b>	<b>0,00%</b>

A continuación, presentamos el código para cada parte del proyecto.

Generación del mosaico Pre y Post incendio.

#### 6.4. Mosaico Pre incendio.

```
library(rgdal)
library(RStoolbox)
library(raster)
library(sp)
library(rgdal)
library(sf)
library(rasterVis)
library(lattice)
library(latticeExtra)
setwd("D:/PROY_IMG")
#cargamos las imagenes POST INCENDIO preprocesadas en ENVI
img1 = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_PRE/IMAGEN 230069/BM_FLASH_230069")
img2 = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_PRE/IMAGEN 230070/BM_FLASH_230070")
img3 = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_PRE/IMAGEN 230071/BM_FLASH_230071")
img4 = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_PRE/IMAGEN 229070/FLASH_229070_OK")
img5 = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_PRE/IMG 229071/229071_FLAAASH_BM")

# ELIMINACION DE LOS BORDES NEGROS DE LAS IMAGENES LANDSAT 8
# Ploteamos la primera imagen de la toma 1
# Luego definimos un subset con contorno color negro y lo enmascaramos con la imagen original
# como resultado obtenemos la imagen landsat sin bordes negros los cuales podrian
# generar mala informacion en el area de estudio
plotRGB(img1, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="IMAGEN PRE INCENDIO TOMA 1")
subt1 = drawPoly(show=TRUE, col="black")
subt1_im = mask(img1, subt1)
plotRGB(subt1_im, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="CORTE EN LA TOMA 1 PRE INCENDIO")
# ELIMINACION DE BORDES NEGROS EN LA TOMA 2
plotRGB(img2, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="IMAGEN PRE INCENDIO TOMA 2")
subt2 = drawPoly(show=TRUE, col="black")
subt2_im = mask(img2, subt2)
plotRGB(subt2_im, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="CORTE EN LA TOMA 2 PRE INCENDIO")
# ELIMINACION DE BORDES NEGROS EN LA TOMA 3
plotRGB(img3, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="IMAGEN PRE INCENDIO TOMA 3")
subt3 = drawPoly(show=TRUE, col="red")
subt3_im = mask(img3, subt3)
plotRGB(subt3_im, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="CORTE EN LA TOMA 3 PRE INCENDIO")
# ELIMINACION DE BORDES NEGROS EN LA TOMA 4
plotRGB(img4, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="IMAGEN PRE INCENDIO TOMA 4")
subt4 = drawPoly(show=TRUE, col="yellow")
subt4_im = mask(img4, subt4)
plotRGB(subt4_im, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="CORTE EN LA TOMA 4 PRE INCENDIO")
# ELIMINACION DE BORDES NEGROS EN LA TOMA 5
plotRGB(img5, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="IMAGEN PRE INCENDIO TOMA 5")
subt5 = drawPoly(show=TRUE, col="blue")
subt5_im = mask(img5, subt5)
plotRGB(subt5_im, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="CORTE EN LA TOMA 5 PRE INCENDIO")
# VERIFICACION DE LOS ORIGENES DE CADA SUBSET
origin(subt1_im)
origin(subt2_im)
origin(subt3_im)
```

```

origin(subt4_im)
origin(subt5_im)
# COMO EL SUBSET 4 ES DIFEENTE A LOS DEMAS, LO IGUALAMOS PARA REALIZAR EL MOSAICO
origin(subt4_im) = origin(subt5_im)
origin(subt4_im)
# REALIZAMOS EL MOSAICO DE LAS 5 TOMAS CON LA FUNCION MEAN
# LA FUNCION MEAN CALCULA UN PROMEDIO CUANDO EXISTE TRASLAPE DE INFORMACION DE
PIXELES
mosaico_1pre = mosaic(subt1_im, subt2_im, subt4_im, fun= min)
mosaico_2pre = mosaic(subt3_im, subt5_im, fun= mean)
mosaico_3pre = mosaic(mosaico_1pre, mosaico_2pre, fun= mean)
plotRGB(mosaico_1pre, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main = "MOSAICO DE LAS TOMAS 1-2-4 PRE
INCENDIO")
plotRGB(mosaico_2pre, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main = "MOSAICO DE LAS TOMAS 3 - 5 PRE
INCENDIO")
plotRGB(mosaico_3pre, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main = "MOSAICO DE LAS TOMAS PRE
INCENDIO")
#Cargamos el shipe file de algunos municipios de Santa Cruz
municipio=readOGR("C:/Users/Asus/Downloads/Municipio_FocoCalor14092020/Municipio_FocoCalor14092020/Munic
ipio_FocoCalor14092020.shp")
plot(municipio)
View(municipio@data) #observamos el id del municipio de SIV
municipio_8 = municipio[municipio$id == "8",] #Extraemos solo el municipio de SIV
plot(municipio_8) #shape file de San Ignacio de Velasco
#Comparamos las coordenadas e igualamos sus coordenadas entre el mosaico y
# el Municipio de San Ignacio de Velasco
compareCRS(municipio_8,mosaico_3pre)
municipio_CRS8 = spTransform(municipio_8, CRS(projection(mosaico_3pre)))
compareCRS(municipio_CRS8,mosaico_3pre)
#Ploteamos el shipe file sobre el mosaico para observar la superposicion
plotRGB(mosaico_3, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main ="MOSAICO DE LAS TOMAS POST
INCENDIO")
plot(municipio_CRS8, border="red", lwd=3, add=TRUE)

#----HACEMOS EL CORTE EN EL AREA FINAL, PERO EN RELACION AL SHIPE FILE
mosaico_crop = crop (mosaico_3pre, municipio_CRS8)
plotRGB(mosaico_crop[[4:2]],stretch="lin",axes=TRUE)
#----REALIZAMOS EN ENMASCARADO DEL AREA FINAL CON EL SHIPE FILE
#----GUARDAMOS EL ARCHIVO CON LA EXTENCION .TIF
mosaico_mask_pre = mask(mosaico_crop, municipio_CRS8, filename= "MOSAICO_FINAL_PRE_INCENDIO.TIF")
plotRGB(mosaico_mask_pre[[4:2]],stretch="lin",axes=TRUE)

```

## 6.5. Mosaico Post incendio

```

library(rgdal)
library(RStoolbox)
library(raster)
library(sp)
library(rgdal)
library(sf)
library(rasterVis)
library(lattice)
library(latticeExtra)
setwd("D:/PROY_IMG")
#cargamos las imagenes POST INCENDIO preprocesadas en ENVI
img1_d = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_POST/IMAGEN
1/BM_FLASHPOS_230069")

```

```

img2_d = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_POST/IMAGEN
2/BM_FLASHPOST_230070")
img3_d = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_POST/IMAGEN
3/BM_FLASHPOST_230071")
img4_d = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_POST/IMAGEN
4/BM_FLASHPOST_STACK_229070")
img5_d = brick("C:/Users/Asus/Desktop/teledeteccion img/FLASH_PROY_POST/IMAGEN
5/BM_FLASHPOST_229071")
# ELIMINACION DE LOS BORDES NEGROS DE LAS IMAGENES LANDSAT 8
# Ploteamos la primera imagen de la toma 1
# Luego definimos un subset con contorno color negro y lo enmascaramos con la imagen original
# como resultado obtenemos la imagen landsat sin bordes negros los cuales podrian
# generar mala informacion en el area de estudio
plotRGB(img1_d, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="IMAGEN POST INCENDIO TOMA 1")
sub1 = drawPoly(show=TRUE, col="black")
sub1_img = mask(img1_d, sub1)
plotRGB(sub1_img, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="CORTE EN LA TOMA 1 POST INCENDIO")
# ELIMINACION DE BORDES NEGROS EN LA TOMA 2
plotRGB(img2_d, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="IMAGEN POST INCENDIO TOMA 2")
sub2 = drawPoly(show=TRUE, col="black")
sub2_img = mask(img2_d, sub2)
plotRGB(sub2_img, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="CORTE EN LA TOMA 2 POST INCENDIO")
# ELIMINACION DE BORDES NEGROS EN LA TOMA 3
plotRGB(img3_d, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="IMAGEN POST INCENDIO TOMA 3")
sub3 = drawPoly(show=TRUE, col="red")
sub3_img = mask(img3_d, sub3)
plotRGB(sub3_img, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="CORTE EN LA TOMA 3 POST INCENDIO")
# ELIMINACION DE BORDES NEGROS EN LA TOMA 4
plotRGB(img4_d, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="IMAGEN POST INCENDIO TOMA 4")
sub4 = drawPoly(show=TRUE, col="yellow")
sub4_img = mask(img4_d, sub4)
plotRGB(sub4_img, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="CORTE EN LA TOMA 4 POST INCENDIO")
# ELIMINACION DE BORDES NEGROS EN LA TOMA 5
plotRGB(img5_d, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="IMAGEN POST INCENDIO TOMA 5")
sub5 = drawPoly(show=TRUE, col="blue")
sub5_img = mask(img5_d, sub5)
plotRGB(sub5_img, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="CORTE EN LA TOMA 5 POST INCENDIO")
# VERIFICACION DE LOS ORIGENES DE CADA SUBSET
origin(sub1_img)
origin(sub2_img)
origin(sub3_img)
origin(sub4_img)
origin(sub5_img)
# COMO EL SUBSET 4 ES DIFEENTE A LOS DEMAS, LO IGUALAMOS PARA REALIZAR EL MOSAICO
origin(sub4_img) = origin(sub5_img)
origin(sub4_img)
# REALIZAMOS EL MOSAICO DE LAS 5 TOMAS CON LA FUNCION MEAN
# LA FUNCION MEAN CALCULA UN PROMEDIO CUANDO EXISTE TRASLAPE DE INFORMACION DE
PIXELES
mosaico_1pos = mosaic(sub1_img, sub2_img, sub4_img, fun= min)
mosaico_2pos = mosaic(sub3_img, sub5_img, fun= mean)
mosaico_3pos = mosaic(mosaico_1pos, mosaico_2pos, fun= mean)
plotRGB(mosaico_1pos, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="MOSAICO DE LAS TOMAS 1-2-4 POST
INCENDIO")
plotRGB(mosaico_2pos, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="MOSAICO DE LAS TOMAS 3 - 5 POST
INCENDIO")
plotRGB(mosaico_3pos, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="MOSAICO DE LAS TOMAS POST
INCENDIO")

```

```

#Cargamos el shipe file de algunos municipios de Santa Cruz
municipio=readOGR("C:/Users/Asus/Downloads/Municipio_FocoCalor14092020/Municipio_FocoCalor14092020/Municipio_FocoCalor14092020.shp")
plot(municipio)
View(municipio@data) #observamos el id del municipio de SIV
municipio_8 = municipio[municipio$id == "8",] #Extraemos solo el municipio de SIV
plot(municipio_8) #shape file de San Ignacio de Velasco
#Comparamos las coordenadas e igualamos sus coordenadas entre el mosaico y
# el Municipio de San Ignacio de Velasco
compareCRS(municipio_8,mosaico_3pos)
municipio_CRS8 = spTransform(municipio_8, CRS(projection(mosaico_3pos)))
compareCRS(municipio_CRS8,mosaico_3pos)
#Ploteamos el shipe file sobre el mosaico para observar la superposicion
plotRGB(mosaico_3pos, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="MOSAICO DE LAS TOMAS POST
INCENDIO")
plot(municipio_CRS8, border="orange", lwd=3, add=TRUE)
#----HACEMOS EL CORTE EN EL AREA FINAL, PERO EN RELACION AL SHIPE FILE
mosaico_crop_pos = crop (mosaico_3pos, municipio_CRS8)
plotRGB(mosaico_crop_pos[[4:2]],stretch="lin",axes=TRUE)
#---REALIZAMOS EN ENMASCARADO DEL AREA FINAL CON EL SHIPE FILE
#---GUARDAMOS EL ARCHIVO CON LA EXTENCION .TIF
mosaico_mask_pos = mask(mosaico_crop_pos, municipio_CRS8, filename=
"MOSAICO_FINAL_POSTERIOR_INCENDIO.TIF")
plotRGB(mosaico_mask_pos[[4:2]], stretch="lin", axes=TRUE)

```

## 6.6. Análisis de índices para severidad.

### 6.6.1. Índice DNBR

```

library(rgdal)
library(RStoolbox)
library(rlang)
library(sp)
library(sf)
library(rasterVis)
library(lattice)
library(latticeExtra)
library(ggplot2)
library(tidyr)
library(grid)
library(ggpubr)
library(ggspatial)
require(pacman)
pacman::p_load(raster,gridExtra,rgeos,stringr,ggrepel,hrbrthemes,ghibli,colorspace,gtools,glue)
library(fs)
library(tidyverse)
#IMPORTAMOS LOS MOSAICOS CREADOS DEL ANTES Y DESPUES DEL INCENDIO
mosaico_pre = brick("D:/PROY_IMG/MOSAICO_FINAL_PRE_INCENDIO.TIF")
mosaico_post = brick("D:/PROY_IMG/MOSAICO_FINAL_POSTERIOR_INCENDIO.TIF")
#Ploteamos las imagenes en RGB
plotRGB(mosaico_pre, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="MOSAICO DEL PRE INCENDIO")
plotRGB(area_post, r=4,g=3,b=2, stretch="lin", axes=TRUE, main="MOSAICO DEL POST INCENDIO")
#Aplicamos el indice NBR al pre y post incendio
NBR_pre = (mosaico_pre[[5]] - mosaico_pre[[7]])/(mosaico_pre[[5]] + mosaico_pre[[7]])
NBR_post = (mosaico_post[[5]] - mosaico_post[[7]])/(mosaico_post[[5]] + mosaico_post[[7]])
#Ploteamos las imagenes con el indice NBR

```

```

ggR(NBR_pre,geom_raster = TRUE)+
  ggtitle("NBR ANTES DEL INCENDIO")+
  labs(x="Coordenadas eje [x]",y="Coordenadas eje [y]")+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 30),
        axis.title = element_text(size = 20),
        legend.text = element_text(size = 15),
        panel.grid =element_blank(),
        panel.background = element_rect(fill = "white", color = "gray"))+
  scale_fill_gradientn(name="VALORES\nNBR(PRE INCENDIO)",colours=c("black","green"))+
  geom_sf()+
  annotation_north_arrow(location="tr", which_north = "TRUE", style = north_arrow_nautical,
    height = unit(2 ,"cm"), width = unit(2 , "cm"))
ggR(NBR_post,geom_raster = TRUE)+
  ggtitle("NBR DESPUES DEL INCENDIO")+
  labs(x="Coordenadas eje [x]",y="Coordenadas eje [y]")+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 30),
        axis.title = element_text(size = 20),
        legend.text = element_text(size = 15),
        panel.grid =element_blank(),
        panel.background = element_rect(fill = "white", color = "gray"))+
  scale_fill_gradientn(name="VALORES\nNBR(POST INCENDIO)",colours=c("BLACK","green"))+
  geom_sf()+
  annotation_north_arrow(location="tr", which_north = "TRUE", style = north_arrow_nautical,
    height = unit(2 ,"cm"), width = unit(2 , "cm"))
#Calculamos el DNBR para el pre y post incendio
DNBR= NBR_pre - NBR_post
#Definimos una clase de colores para hacer el ploteo con el indice DNBR
clase = c (-Inf, -0.25,1, -0.25, -0.100, 2, -0.100, 0.100,3, 0.100, 0.27, 4,
  0.270, 0.440, 5, 0.440, 0.660, 6, 0.660, Inf, 7)
mat = matrix(clase, ncol =3, byrow = TRUE)
#Realizamos la reclasificacion del DBNR en base a la matriz dada
clasificacion_dnbr = reclassify(DNBR, mat)
#Hacemos la clasificacion en color_ verde agua rosa celeste amarillo tumbo naranja rojo
mi_color = c("darkgreen", "darkgreen", "darkgreen", "yellow", "orange", "red", "black")
#Ploteamos la nueva reclasificacion
ggR(clasificacion_dnbr,geom_raster = TRUE)+
  ggtitle("MAPA CON INDICE DNBR\nSAN IGNACIO DE VELASCO")+
  labs(x="Coordenadas eje [X]",y="Coordenadas eje [Y]")+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 30),
        axis.title = element_text(size = 20),
        legend.text = element_text(size = 15),
        panel.grid =element_blank(),
        panel.background = element_rect(fill = "white", color = "gray"))+
  scale_fill_gradientn(name="ESCALA DE SEVERIDAD\nCON INDICE DNBR",colours=mi_color)+
  geom_sf()+
  annotation_north_arrow(location="tr", which_north = "TRUE", style = north_arrow_nautical,
    height = unit(2 ,"cm"), width = unit(2 , "cm"))
#Guardamos los mapas generados NBR_pre/ NBR_post/ DNBR
setwd("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/") #D:/PROY_IMG/areas_pre_post
writeRaster(NBR_pre, "NBR_PRE_INCENDIO.tif", drivename = "Gtiff")
writeRaster(NBR_post, "NBR_POST_INCENDIO.tif", drivename = "Gtiff")
writeRaster(DNBR, "DNBR_PRE_POST.tif", drivename = "Gtiff")
writeRaster(clasificacion_dnbr, "CLASIFICACION_SEVERIDAD_DNBR.tif", drivename = "Gtiff")
#cargamos los archivos para probar
NBR_post = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/NBR_POST_INCENDIO.TIF")
NBR_pre = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/NBR_PRE_INCENDIO.TIF")
DNBR = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/DNBR_PRE_POST.TIF")

```

```
clasificacion_dnbr =
brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/CLASIFICACION_SEVERIDAD_DNBR.TIF")
```

## 6.6.2. Índice RBR

```
library(rgdal)
library(RStoolbox)
library(rlang)
library(raster)
library(sp)
library(rgdal)
library(sf)
library(rasterVis)
library(lattice)
library(latticeExtra)
library(ggplot2)
library(tidyr)
library(gridExtra)
library(grid)
library(ggpubr)
library(ggspatial)
require(pacman)
pacman::p_load(raster,gridExtra,rgeos,stringr,ggrepel,hrbrthemes,ghibli,colorspace,gtools,glue)
library(fs)
library(tidyverse)
#Cargamos los archivos necesario para el calculo del indice rbr
dnbr = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/DNBR_PRE_POST.TIF")
nbr_pre = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/NBR_PRE_INCENDIO.TIF")
#calculamos el indice
rbr = dnbr/(nbr_pre+1.001)
rbr

#Definimos una clase de colores para hacer el ploteo con el indice RBR
clase = c (-Inf, 0.07, 1, 0.07, 0.13, 2, 0.13, 0.22, 3, 0.22, 0.32, 4,
0.32, Inf, 5)
mat = matrix(clase, ncol = 3, byrow = TRUE)
#Realizamos la reclasificacion del RNR en base a la matriz dada
clasificacion_rbr = reclassify(rbr, mat)
#Hacemos la clasificacion en colores
mi_color = c("darkgreen", "yellow", "orange", "red", "black")
#Ploteamos la nueva reclasificacion
ggR(clasificacion_rbr,geom_raster = TRUE)+
  ggtitle("MAPA CON INDICE RBR\nSAN IGNACIO DE VELASCO")+
  labs(x="Coordenadas eje [x]",y="Coordenadas eje [y]")+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 30),
        axis.title = element_text(size = 20),
        legend.text = element_text(size = 15),
        panel.grid =element_blank(),
        panel.background = element_rect(fill = "white", color = "gray"))+
  scale_fill_gradientn(name="ESCALA DE SEVERIDAD\nCON INDICE RBR",colours=mi_color)+
  geom_sf()+
  annotation_north_arrow(location="tr", which_north = "TRUE", style = north_arrow_nautical,
        height = unit(2 , "cm"), width = unit(2 , "cm"))
#Guardamos el mapa generado
setwd("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/")
writeRaster(rbr, "CLASIFICACION_RBR.tif", drivename = "Gtiff")
```

```
#--- cargamos archivo
clasificacion_rbr = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/CLASIFICACION RBR.TIF")
```

### 6.6.3. Índice RDNBR

```
library(rgdal)
library(RStoolbox)
library(rlang)
library(raster)
library(sp)
library(rgdal)
library(sf)
library(rasterVis)
library(lattice)
library(latticeExtra)
library(ggplot2)
library(tidyr)
library(gridExtra)
library(grid)
library(ggpubr)
library(ggspatial)
require(pacman)
pacman::p_load(raster,gridExtra,rgeos,stringr,ggrepel,hrbrthemes,ghibli,colorspace,gtools,glue)
library(fs)
library(tidyverse)
#Cargamos los archivos necesarios para el calculo del indice rdnbr
dnbr = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/DNBR_PRE_POST.TIF")
nbr_pre = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/NBR_PRE_INCENDIO.TIF")
#calculamos el indice rdnbr
rdnbr = (dnbr)*1000/(sqrt(abs(nbr_pre)))
rdnbr
#Definimos una clase de umbrales para hacer el ploteo con el indice rdnbr
clase = c (-Inf, 16.4, 1, 16.4, 316.7, 2, 316.7, 734.7, 3, 316.7, Inf, 4)
mat = matrix(clase, ncol =3, byrow = TRUE)
#Realizamos la reclasificacion del rdnbr en base a la matriz dada
clasificacion_rdnbr = reclassify(rdnbr, mat)
#Hacemos la clasificacion en colores
mi_color = c("darkgreen", "yellow", "red", "black")
#Ploteamos la nueva reclasificacion
ggR(clasificacion_rdnbr,geom_raster = TRUE)+
  ggtitle("MAPA CON INDICE RDNBR\nSAN IGNACIO DE VELASCO")+
  labs(x="Coordenadas eje [x]",y="Coordenadas eje [y]")+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 30),
        axis.title = element_text(size = 20),
        legend.text = element_text(size = 15),
        panel.grid =element_blank(),
        panel.background = element_rect(fill = "white", color = "gray"))+
  scale_fill_gradientn(name="ESCALA DE SEVERIDAD\nCON INDICE RDNBR",colours=mi_color,na.value =
"white")+
  geom_sf()+
  annotation_north_arrow(location="tr", which_north = "TRUE", style = north_arrow_nautical,
        height = unit(2 ,"cm"), width = unit(2, "cm"))
#Guardamos el mapa generado
setwd("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/")
writeRaster(clasificacion_rdnbr, "CLASIFICACION RDNBR.tif", drivename = "Gtiff")
writeRaster(rdnbr, "RDNBR.tif", drivename = "Gtiff")
zoom()
```

```
# cargamos archivo
clasificacion_rdnbr = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/CLASIFICACION RDNBR.TIF")
rdnbr = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/RDNBR.TIF")
```

## 6.7. Comparación de índices de severidad con índice CBI

```
library(raster)
library(sp)
library(rgdal)
library(sf)
library(rgdal)
library(caret)
library(ggplot2)
# CARGAMOS DATOS
dnbr = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/DNBR_PRE_POST.TIF")
rbr = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/RBR.TIF")
rdnbr = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/RDNBR.TIF")
dato_campo = read.csv2("C:/Users/Asus/Desktop/1040/DATS.csv")
dato_campo
#CONVERTIMOS A DATA FRAME
df = data.frame(dato_campo)
df
#OBSERVAMOS QUE LAS VARIABLES MAP_X, MAP_Y SON DEL TIPO CARACTER
str(df)
#CAMBIAMOS A NUMERO LAS VARIABLES MAP_X, MAP_Y DEL DATA FRAME
#dato_campo$MAP_X = as.numeric(dato_campo$MAP_X)
df$MAP_X = as.numeric(df$MAP_X)
df$MAP_Y = as.numeric(df$MAP_Y)
#ASIGNAMOS COORDENADAS
coordinates(df) = ~ MAP_X + MAP_Y
crs(df) = '+proj=utm +zone=20 +south +datum=WGS84 +units=m +no_defs '
#GRAFICAMOS LOS PUNTOS
plot(df, pch = 16)
head(df)
#extraemos datos DNBR. RBR, RDNBR
dat_dnbr = extract(dnbr,df)
dat_rbr = extract(rbr,df)
dat_rdnbr = extract(rdnbr,df)
head(dat_dnbr)
dat_rbr
dat_rdnbr
#--- union de datos
# unimos en un data frame la severidad en campo y en otra columna
# ponemos la reflectancia segun el indice aplicado
cbi_dnbr = data.frame(cbind(campo=df$SEV, mapa = dat_dnbr))
cbi_rbr = data.frame(cbind(campo=df$SEV, mapa = dat_rbr))
cbi_rdnbr = data.frame(cbind(campo=df$SEV, mapa = dat_rdnbr))
cbi_indices = data.frame(cbind(campo=df$SEV, dnbr = dat_dnbr, rbr = dat_rbr, rdnbr = dat_rdnbr))
head(cbi_dnbr)
head(cbi_rbr)
head(cbi_rdnbr)
head(cbi_indices)
# cambiamos los nombres de las columnas, para que al aplicar la regresion sea facil distinguir
names(cbi_dnbr) = c("campo", "dnbr")
names(cbi_rbr) = c("campo", "rbr")
names(cbi_rdnbr) = c("campo", "rdnbr")
names(cbi_indices) = c("campo", "dnbr", "rbr", "rdnbr")
```

```

head(cbi_dnbr)
head(cbi_rbr)
head(cbi_rdnbr)
head(cbi_indices)
# muestreo de datos
set.seed(123)
# usamos el 50% de los datos para entrenar y el 50% para testear
train_samples = cbi_indices$campo %>% createDataPartition(p=0.5, list=FALSE)
train_samples
train_dat = cbi_indices[train_samples,]
train_dat # MUESTRAS DE ENTRENAMIENTO
test_dat = cbi_indices[-train_samples,]
test_dat # MUESTRAS DE TESTEO
# Graficando puntos
graf_dnbr = ggplot(data = train_dat,
  mapping = aes(y=train_dat$campo, x= train_dat$dnbr))
graf_rbr = ggplot(data = train_dat,
  mapping = aes(y=train_dat$campo, x= train_dat$rbr))
graf_rdnbr = ggplot(data = train_dat,
  mapping = aes(y=train_dat$campo, x= train_dat$rdnbr))
#Grafico para puntos DNBR
graf_dnbr+geom_jitter(colour = "#142473", size = 2.5)+
  scale_y_continuous(breaks = seq(0,3,0.5))+
  scale_x_continuous(breaks = seq(-0.2,1,0.2))+
  ggtitle("Valores CBI versus DNBR")+
  labs(x="Severidad en el mapa [DNBR]",y="Severidad en campo [CBI]")+
  theme_minimal()+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 20),
    axis.title = element_text(size = 15),legend.text = element_text(size = 15),
    panel.background = element_rect(fill = "#BBD9ED", color = "black")) #BBD9ED #B4E3EE
#Grafico para puntos RBR
graf_rbr+geom_jitter(colour = "#142473", size = 2.5)+
  scale_y_continuous(breaks = seq(0,3,0.5))+
  scale_x_continuous(breaks = seq(-0.2,1,0.2))+
  ggtitle("Valores CBI versus RBR")+
  labs(x="Severidad en el mapa [RBR]",y="Severidad en campo [CBI]")+
  theme_minimal()+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 20),
    axis.title = element_text(size = 15),legend.text = element_text(size = 15),
    panel.background = element_rect(fill = "#BBD9ED", color = "black"))
#Grafico para puntos RDNBR
graf_rdnbr+geom_jitter(colour = "#001961", size = 2.5)+
  scale_y_continuous(breaks = seq(0,3,0.5))+
  scale_x_continuous(breaks = seq(-600,1500,300))+
  ggtitle("Valores CBI versus RDNBR")+
  labs(x="Severidad en el mapa [RDNBR]",y="Severidad en campo [CBI]")+
  theme_minimal()+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 20),
    axis.title = element_text(size = 15),legend.text = element_text(size = 15),
    panel.background = element_rect(fill = "#BBD9ED", color = "black"))
# construccion del modelo DNBR
mod_dnbr1 = lm(campo ~ dnbr , data= train_dat)
mod_dnbr2 = lm(campo ~ dnbr + I(dnbr^2), data= train_dat) # MODELO CUADRATICO
mod_dnbr3 = lm(campo ~ poly(dnbr,3, raw = T), data= train_dat) # este modelo es el mejor CUBICO
train_dat[c("64","65","68","69","73","75"),1] <- 0.01
mod_dnbr4 = lm(log(campo) ~ dnbr, data= train_dat) # MODELO ESPONENCIAL
train_dat[c("64","65","68","69","73","75"),1] <- 0
train_dat[c("64","65","68","69","73","75"),2] <- 0.01

```

```

mod_dnbr5 = lm(campo ~ log(dnbr), data= train_dat)# MODELO LOGARITMICO
train_dat[c("64","65","68","69","73","75"),2] <- c(-0.225084513,-0.225084513,-0.067175336,-0.311277270,-
0.080047011,-0.028775856)
summary(mod_dnbr5)
# construccion del modelo RBR
mod_rbr1 = lm(campo ~ rbr , data= train_dat)
mod_rbr2 = lm(campo ~ rbr + I(rbr^2), data= train_dat) # MODELO CUADRATICO
mod_rbr3 = lm(campo ~ poly(rbr,3, raw = T), data= train_dat) # este modelo es el mejor CUBICO
train_dat[c("64","65","68","69","73","75"),1] <- 0.01
mod_rbr4 = lm(log(campo) ~ rbr, data= train_dat) # MODELO ESPONENCIAL
train_dat[c("64","65","68","69","73","75"),1] <- 0
train_dat[c("64","65","68","69","73","75"),3] <- 0.01
mod_rbr5 = lm(campo ~ log(rbr), data= train_dat)# MODELO LOGARITMICO
train_dat[c("64","65","68","69","73","75"),3] <- c(-0.20381667,-0.20381667,-0.06998524,-0.26553631,-0.05524718,-
0.02457596)
summary(mod_rbr3)
# construccion del modelo RDNBR
mod_rdnbr1 = lm(campo ~ rdnbr , data= train_dat)
mod_rdnbr2 = lm(campo ~ rdnbr + I(rdnbr^2), data= train_dat) # MODELO CUADRATICO
mod_rdnbr3 = lm(campo ~ poly(rdnbr,3, raw = T), data= train_dat) # este modelo es el mejor CUBICO
train_dat[c("64","65","68","69","73","75"),1] <- 0.01
mod_rdnbr4 = lm(log(campo) ~ rdnbr, data= train_dat) # MODELO ESPONENCIAL
train_dat[c("64","65","68","69","73","75"),1] <- 0
train_dat[c("64","65","68","69","73","75"),4] <- 0.01
mod_rdnbr5 = lm(campo ~ log(rdnbr), data= train_dat)# MODELO LOGARITMICO
train_dat[c("64","65","68","69","73","75"),4] <- c(-700.15594,-700.15594,-331.15042,-752.17865,-119.60798,-69.81335)
summary(mod_rdnbr2)
#OBSERVANDO TODOS LOS MODELOS
library(broom)
library(tidyverse)
m=glance(mod_dnbr1)
# El comando glance nos muestra todos los parametrsos del modelo
# Se le pide al programa mostrar solo r ajustado y AIC
# Modelos para indice DNBR
d_mod_dnbr1=glance(mod_dnbr1) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.lineal")
d_mod_dnbr2=glance(mod_dnbr2) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.cuadratica")
d_mod_dnbr3=glance(mod_dnbr3) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.cubica")
d_mod_dnbr4=glance(mod_dnbr4) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.exponencial")
d_mod_dnbr5=glance(mod_dnbr5) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.logaritmica")
# modelos para indice RBR
d_mod_rbr1=glance(mod_rbr1) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.lineal")
d_mod_rbr2=glance(mod_rbr2) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.cuadratica")
d_mod_rbr3=glance(mod_rbr3) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.cubica")
d_mod_rbr4=glance(mod_rbr4) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.exponencial")
d_mod_rbr5=glance(mod_rbr5) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.logaritmica")
# modelos para indice RDNBR
d_mod_rdnbr1=glance(mod_rdnbr1) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.lineal")

```

```

d_mod_rdnbr2=glance(mod_rdnbr2) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.cuadratica")
d_mod_rdnbr3=glance(mod_rdnbr3) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.cubica")
d_mod_rdnbr4=glance(mod_rdnbr4) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.exponencial")
d_mod_rdnbr5=glance(mod_rdnbr5) %>% dplyr::select(r.squared, adj.r.squared, p.value, AIC) %>% mutate(Modelo
="R.logaritmica")

#observamos los podemos unidos DNBR
modelos_dnbr = bind_rows(d_mod_dnbr1, d_mod_dnbr2, d_mod_dnbr3, d_mod_dnbr4, d_mod_dnbr5) %>%
  arrange(AIC) %>% mutate(Delta_AIC = AIC - min(AIC))
modelos_dnbr
#observamos los podemos unidos RBR
modelos_rbr = bind_rows(d_mod_rbr1, d_mod_rbr2, d_mod_rbr3, d_mod_rbr4, d_mod_rbr5) %>%
  arrange(AIC) %>% mutate(Delta_AIC = AIC - min(AIC))
modelos_rbr
#observamos los podemos unidos RDNBR
modelos_rdnbr = bind_rows(d_mod_rdnbr1, d_mod_rdnbr2, d_mod_rdnbr3, d_mod_rdnbr4, d_mod_rdnbr5) %>%
  arrange(AIC) %>% mutate(Delta_AIC = AIC - min(AIC))
modelos_rdnbr
#Graficamos el mejor modelo en este caso el DNBR cubico
z=graf_dnbr+geom_jitter(colour = "#142473", size = 2.5)+
  scale_y_continuous(breaks = seq(0,3,0.5))+
  scale_x_continuous(breaks = seq(-0.2,1,0.2))+
  stat_smooth( method = "lm", formula = y~poly(x,3, raw = T), colour = "#C64141")+
  ggtitle("Ajuste de la regresion cubica DNBR")+
  labs(x="Severidad en el mapa [DNBR]",y="Severidad en campo [CBI]")+
  theme_minimal()+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 20),
        axis.title = element_text(size = 15),legend.text = element_text(size = 15),
        panel.background = element_rect(fill = "#BBD9ED", color = "black"))+
  geom_text(data = data.frame(x = -0.263795788392881, y = 2.8437283219366, label = "Severidad = 0.25701 +
2.33495×DNBR + 4.51893×DNBR2 - 4.00174×DNBR3"),
  mapping = aes(x = x, y = y, label = label),
  size = 5, lineheight = 2L, hjust = 0L, fontface = 1, inherit.aes = FALSE)+
  geom_text(data = data.frame(x = -0.263795788392881, y = 3.22520791186455, label = "Ecuacion de la regresion
cubica:"),
  mapping = aes(x = x, y = y, label = label),
  size = 6, lineheight = 2L, hjust = 0L, fontface = 1, inherit.aes = FALSE)+
  geom_text(data = data.frame(x = -0.263795788392881, y = 2.462248732, label = "R2 Ajustado de: 90.89 %"),
  mapping = aes(x = x, y = y, label = label),
  size = 5, lineheight = 2L, hjust = 0L, fontface = 1, inherit.aes = FALSE)
z
#Graficamos el mejor modelo en este caso el RBR cubico
z1=graf_rbr+geom_jitter(colour = "#142473", size = 2.5)+
  scale_y_continuous(breaks = seq(0,3,0.5))+
  scale_x_continuous(breaks = seq(-0.2,1,0.2))+
  stat_smooth( method = "lm", formula = y~poly(x,3, raw = T), colour = "#C64141")+
  ggtitle("Ajuste de la regresion cubica RBR")+
  labs(x="Severidad en el mapa [RBR]",y="Severidad en campo [CBI]")+
  theme_minimal()+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 20),
        axis.title = element_text(size = 15),legend.text = element_text(size = 15),
        panel.background = element_rect(fill = "#BBD9ED", color = "black"))+
  geom_text(data = data.frame(x = -0.263795788392881, y = 2.8437283219366, label = "Severidad = 0.1961 +
3.1013×RBR + 8.4698×RBR2 - 10.0802×RBR3"),
  mapping = aes(x = x, y = y, label = label),

```

```

      size = 5, lineheight = 2L, hjust = 0L, fontface = 1, inherit.aes = FALSE)+
geom_text(data = data.frame(x = -0.263795788392881, y = 3.22520791186455, label = "Ecuacion de la regresion
cubica:"),
  mapping = aes(x = x, y = y, label = label),
  size = 6, lineheight = 2L, hjust = 0L, fontface = 1, inherit.aes = FALSE)+
geom_text(data = data.frame(x = -0.263795788392881, y = 2.462248732, label = "R2 Ajustado de: 88.63 %"),
  mapping = aes(x = x, y = y, label = label),
  size = 5, lineheight = 2L, hjust = 0L, fontface = 1, inherit.aes = FALSE)
z1
#Graficamos el mejor modelo en este caso el RDNBR cuadratico
z2=graf_rdnbr+geom_jitter(colour = "#142473", size = 2.5)+
scale_y_continuous(breaks = seq(0,3,0.5))+
scale_x_continuous(breaks = seq(-600,1500,300))+
stat_smooth( method = "lm", formula = y~poly(x,2, raw = T), colour = "#C64141")+
ggtitle("Ajuste de la regresion cuadratica RDNBR")+
labs(x="Severidad en el mapa [RDNBR]",y="Severidad en campo [CBI]")+
theme_minimal()+
theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 20),
  axis.title = element_text(size = 15),legend.text = element_text(size = 15),
  panel.background = element_rect(fill = "#BBD9ED", color = "black"))+
geom_text(data = data.frame(x = -500.463795788392881, y = 2.8437283219366, label = "Severidad = 0.4061 +
0.00106×RDNBR + 4.64×(10-7)×RDNBR2"),
  mapping = aes(x = x, y = y, label = label),
  size = 5, lineheight = 2L, hjust = 0L, fontface = 1, inherit.aes = FALSE)+
geom_text(data = data.frame(x = -500.463795788392881, y = 3.22520791186455, label = "Ecuacion de la regresion
cuadratica:"),
  mapping = aes(x = x, y = y, label = label),
  size = 6, lineheight = 2L, hjust = 0L, fontface = 1, inherit.aes = FALSE)+
geom_text(data = data.frame(x = -500.463795788392881, y = 2.462248732, label = "R2 Ajustado de: 70.28 %"),
  mapping = aes(x = x, y = y, label = label),
  size = 5, lineheight = 2L, hjust = 0L, fontface = 1, inherit.aes = FALSE)
z2
# Probando el mejor modelo cubico DNBR con las muestras de testeo
predicciones = mod_dnbr3 %>% predict(test_dat)
predicciones
df_predicciones = as.data.frame(predicciones)
# En la variable predicciones observamos los datos calculados por el modelo de regresion
# podemos compararlos con la variable test_dat
df_predicciones
test_dat
pred_test = data.frame(cbind(df_predicciones, test_dat$campo))
# En la variable pred_test podemos comparar los valores predichos con los valores de campo
head(pred_test)
pred_test
#--- observamos los valores de R y R2 ajustado para ver si el modelo predijo de manera correcta
A = (data.frame(
  V_RMSE = RMSE(predicciones, test_dat$campo),
  V_R2 = R2(predicciones, test_dat$campo) ))
A

```

## 6.8. Aplicación del modelo y resultados.

```

library(rgdal)
library(RStoolbox)
library(rasterVis)
library(lattice)
library(latticeExtra)

```

```

library(ggplot2)
library(tidyr)
library(grid)
library(ggpubr)
require(pacman)
pacman::p_load(raster,gridExtra,rgeos,stringr,ggrepel,hrbrthemes,ghibli,colorspace,gtools,glue,sp,rgdal,sf,r1ang)
library(fs)
library(tidyverse)
library(cowplot)
library(KernSmooth)
#CARGAMOS EL ARCHIVO DEL DNBR SIN REGRESION
dnbr = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/DNBR_PRE_POST.TIF")
#DEFINIMOS CONSTANTES OBTENIDAS EN LA REGRESION
intercepto = 0.25701
dnbr1 = 2.33495
dnbr2 = 4.51893
dnbr3 = 4.00174
#APLICAMOS LA FORMULA DE REGRESION PARA EL DNBR
DNBR_C = intercepto + dnbr1 * dnbr + dnbr2 * (dnbr^2) + dnbr3 * (dnbr^3)
#OBSERVAMOS LOS VALORES DEL DNBR_C Y VEMOS UN MAXIMO DE 44.8
DNBR_C
setwd("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/")
writeRaster(DNBR_C, "mapa con regr cubica dnbr.tif", drivename = "Gtiff")
DNBR_C = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/mapa con regr cubica dnbr.tif")
# CON EL HISTOGRAMA SE PUEDE VER QUE HAY POCOS VALORES ALTOS, ESTO OCURRE DEBIDO A
LOS EXTREMOS
# ENTONCES ESTE VALOR NO TENDRA SIGNIFICANCIA EN LA CLASIFICACION
ggplot(DNBR_C, aes(x=layer))+
  geom_histogram(binwidth = 0.1, col="black", fill="darkblue")+
  ggtitle("HISTOGRAMA DE VALORES DE SEVERIDAD")+
  labs(y="Frecuencia",x="Valor de la Severidad",
       caption = "Elaborado por Univ. Alex Salcedo Ticona")+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 28),
        axis.title = element_text(size = 25),
        axis.text = element_text(size = 16),
        plot.caption = element_text(size = 15, color = "black"),
        panel.grid =element_blank(),
        panel.grid.major = element_line(colour = "grey",linetype = 2),
        panel.grid.minor = element_line(colour = "transparent"),
        panel.background = element_rect(fill = "white", color = "black"))+
  scale_x_continuous(breaks = seq(-1,17,1))
# Definimos los limites de clasificacion en base al CBI
clase = c (-Inf, 0.5 , 1 , 0.5, 1.25, 2, 1.25, 2.25, 3, 2.25, Inf, 4)
mat = matrix(clase, ncol =3, byrow = TRUE)
#Realizamos la reclasificacion del DBNR en base a la matriz dada
clasificacion_dnbr = reclassify(DNBR_C, mat)
clasificacion_dnbr
#corte en para ver el area de estudio
i = extent(783469,790018.5,8212290,8218646)
area_est = crop(clasificacion_dnbr,i)
#guardamos los archivos
setwd("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/")
writeRaster(clasificacion_dnbr, "clasificacion final.tif", drivename = "Gtiff")
writeRaster(area_est, "corte de clasificacion final.tif", drivename = "Gtiff")
#cargamos los archivos
clasificacion_dnbr = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/clasificacion final.tif")
area_est = brick("D:/PROY_IMG/AREA_PRE_POST_NUEVAS/corte de clasificacion final.tif")
#cargamos el shipe file

```

```

sc =
st_read("C:/Users/Asus/Downloads/Comando_Incidente_SantaCruz_Mdef20082019/Comando_Incidente_SantaCruz_Mdef20082019/Comando_Incidente_SantaCruz_Mdef20082019.shp")
municipio=st_read("C:/Users/Asus/Downloads/Municipio_FocoCalor14092020/Municipio_FocoCalor14092020/Municipio_FocoCalor14092020.shp")
#Cambiamos un valor del shipe file para facilitar el ploteo
plot(sc)
sa=sc[1]
plot(sa)
sa$ID=0
sa$ID[51]=2
sa$ID[51]
#Aqui usamos el segundo shipe file para el segundo mapa
s_i=municipio[10,]
#cargamos archivo de puntos para mejorar la imagen final
dato_campo= read.csv2('C:/Users/Asus/Desktop/1040/DATS.csv')
#CONVERTIMOS A DATA FRAME
df = data.frame(dato_campo)
#CAMBIAMOS A TIPO NUMERO LAS VARIABLES X,Y
df$MAP_X = as.numeric(df$MAP_X)
df$MAP_Y = as.numeric(df$MAP_Y)
#ASIGNAMOS COORDENADAS
coordinates(df) = ~ MAP_X + MAP_Y
# ASIGNAMOS UN CRS
crs(df) = '+proj=utm +zone=20 +south +datum=WGS84 +units=m +no_defs '
sdf2 = st_as_sf(df)
#Ploteamos el shipefile de santa cruz
mapa_sc=ggplot()+
  geom_sf(data = sa, aes(fill=ID),col="black")+
  ggtitle("Departamento de\nSanta Cruz")+
  scale_fill_gradientn(colours=c("grey","orange"))+
  theme_bw()+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 10),
        panel.grid.major = element_line(colour = "grey",linetype = 2),
        panel.grid.minor = element_line(colour = "red"),
        panel.background = element_rect(fill = "white", color = "black"),
        axis.text.x = element_blank(),
        axis.text.y = element_blank(),
        axis.ticks = element_blank(),
        legend.position = 'none')
mapa_sc
#Ploteamos el shipe file de San Ignacio
mapa_si=
ggplot()+
  geom_sf(data = s_i,aes(fill=id),col="black")+
  ggtitle("San Ignacio\nde Velasco")+
  scale_fill_gradientn(colours=c("grey","green"))+
  theme_bw()+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 13,color = "black"),
        plot.background = element_rect(fill = "transparent", color = "transparent"),
        panel.grid.major = element_line(colour = "grey",linetype = 2),
        panel.grid.minor = element_line(colour = "red"),
        panel.background = element_rect(fill = "white", color = "black"),
        axis.text.x = element_blank(),
        axis.text.y = element_blank(),
        axis.ticks = element_blank(),
        legend.position = 'none')
mapa_si

```

```

#definimos colores de ploteo
mi_color = c("#C5EECC", "yellow", "orange", "red")
mi_color2 = c("#6BB277", "#FFF522", "orange", "red")
mi_color3 = c("darkgreen", "#FFF522", "orange", "red")
#Graficamos el mapa con las diferentes severidades
a=ggR(clasificacion_dnbr,geom_raster = TRUE)+
  ggtitle("MAPA CON NIVELES DE SEVERIDAD\nSAN IGNACIO DE VELASCO")+
  labs(y="Coordenadas Latitud [Sur]",x="Coordenadas Longitud [Oeste]",
    caption = "Elaborado por Univ. Alex Salcedo Ticona")+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 25),
    axis.title = element_text(size = 18),
    plot.caption = element_text(size = 11, color = "black"),
    legend.text = element_text(size = 13),
    legend.justification = c(0,0),
    legend.position = c(0.75,0.3),
    panel.grid =element_blank(),
    panel.background = element_rect(fill = "white", color = "gray"))+
  scale_fill_gradientn(name="NIVEL DE\nSEVERIDAD",colours=mi_color, na.value = "white")+
  annotation_scale(location="br", width_hint =.5)+
  annotation_north_arrow( which_north = "TRUE", style = north_arrow_nautical,
    height = unit(2 , "cm"), width = unit(2 , "cm"))+
  geom_sf(sdf2 ,mapping = aes(group=SEV), color="transparent")
a
#mapa final municipio completo
ggdraw()+
  draw_plot(a)+
  draw_plot(mapa_sc, x=0.57,y=0.67, width=0.14,height=0.21 )
#Observando el area de estudio y los puntos de campo
#PLOTEAMOS EL AREA COMO TAMBIEN LOS PUNTOS
plot(area_est, main="Mapa con severidad y puntos de estudio", axes=T, xlab="Coordenadas eje [Sur]", ylab =
"Coordenadas eje [Oeste]", col= mi_color)
#ploteamos los puntos sobre nuestra area
plot(df, pch = 16, add=T, col="blue", cex=1)
#Graficando mapa y los puntos con sus respectivas severidades
#categorizamos las variables
sdf2$SEV[c(1:30)]="1-Alto"
sdf2$SEV[c(31:45)]="2-Moderado"
sdf2$SEV[c(46:60)]="3-Bajo"
sdf2$SEV[c(61:75)]="4-Nulo"
#ploteamos todo junto
ggR(area_est,geom_raster = TRUE)+
  ggtitle("MAPA CON NIVELES DE SEVERIDAD Y\nPUNTOS DEL TRABAJO DE CAMPO")+
  labs(y="Coordenadas Latitud [Sur]",x="Coordenadas Longitud [Oeste]",
    caption = "Elaborado por Univ. Alex Salcedo Ticona")+
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 20),
    axis.title = element_text(size = 17),
    plot.caption = element_text(size = 10, color = "#808B96"),
    legend.text = element_text(size = 13),
    legend.justification = c(0,0),
    legend.position = c(0.042,0.36), #0.042,0.66
    plot.background = element_rect(fill = "white",colour = "black",linewidth = 1),
    legend.background = element_blank(),
    panel.grid =element_blank(),
    panel.background = element_rect(fill = "white", color = "gray"))+
  scale_fill_gradientn(name="ESCALA DE\nSEVERIDAD",colours=mi_color,na.value = "white")+
  annotation_scale(location="br", width_hint =0.6,pad_x = unit(0.7 , "cm"))+
  annotation_north_arrow(location="tr",pad_x = unit(0.6 , "cm"), pad_y = unit(0.7 , "cm"), which_north = "TRUE",
    style = north_arrow_nautical(),height = unit(2 , "cm"), width = unit(2 , "cm"))+

```

```

geom_sf(data=sdf2, mapping = aes(color=SEV),shape=15, size=2, alpha=1 )+
scale_colour_manual(name="SEVERIDAD\nEN CAMPO",values = c("red","#D77C15", "#FFDC00","#5DADE2"))+
geom_sf(data=sdf2, mapping = aes(group=SEV),shape=0, size=2,color="black", alpha=1 )

#Graficando el area cortada
m=ggR(area_est,geom_raster = TRUE)+
ggtitle("MAPA CON NIVELES DE SEVERIDAD\nDEL AREA DE ESTUDIO")+
labs(y="Coordenadas Latitud [Sur]",x="Coordenadas Longitud [Oeste]",
caption = "Elaborado por Univ. Alex Salcedo Ticona")+
theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size = 20),
axis.title = element_text(size = 17),
plot.caption = element_text(size = 10, color = "darkgray"),#"#808B96"
legend.text = element_text(size = 13),
legend.justification = c(0,0),
legend.position = c(0.042,0.66), #0.042,0.66
plot.background = element_rect(fill = "white",colour = "black",linewidth = 1),
legend.background = element_blank(),
panel.grid =element_blank(),
panel.background = element_rect(fill = "white", color = "gray"))+
scale_fill_gradientn(name="ESCALA DE\nSEVERIDAD",colours=mi_color2,na.value = "white")+
guides(file="none")+
annotation_scale(location="br", width_hint=0.6,pad_x = unit(0.7 , "cm"))+
annotation_north_arrow(location="br",pad_x = unit(0.6 , "cm"), pad_y = unit(0.7 , "cm"), which_north = "TRUE",
style = north_arrow_nautical(),height = unit(2 , "cm"), width = unit(2 , "cm"))+
geom_sf(sdf2 ,mapping = aes(group=SEV), color="transparent")
m
#Area cortada final
ggdraw()+
draw_plot(m)+
draw_plot(mapa_si, width=0.25,height=0.24,scale = 1, x=0.555, y=0.625 )
# Calculando areas
# Determinacion de area em m2
# Llevamos a puntos nuestro raster y lo convertimos data frame
tabla_in= rasterToPoints(area_est, spatial = F)
tabla = as.data.frame(tabla_in)
names(tabla) = c("x", "y", "clase") #las clases del 1 al 4
names(tabla)
library(dplyr)
#Sumatoria
#Contamos los puntos de cada grupo
conteo_tabla = summarise(group_by(tabla, clase), count= n())
#Pixel a hectarea, mutate para agregar nuevas columnas
datos_area = mutate(conteo_tabla, metros = count * xres(area_est)^2, hectareas=metros/10000,
porcentaje = (hectareas/sum(hectareas))*100)
#descripcion de cada clase
descrip = c("Zonas estables o sin quemar",
"Zonas quemadas con gravedad baja",
"zonas quemadas con gravedad moderada",
"zonas quemadas con gravedad alta")
descrip_1 = cbind(c(1:4), descrip)
colnames(descrip_1) = c("clase","Descripcion")
union = merge(x = datos_area, y = descrip_1, by = "clase")
#En la variable union se encuentra la cantidad de area afectada por cada nivel de severidad
Unión

```

## REFERENCIAS

- [1] P. Lykke E. Andersen, «SUSTAINABLE DEVELOPMENT SOLUTIONS NETWORK – BOLIVIA,» 2018. [En línea]. Available: <https://sdsnbolivia.org/deforestacion-e-incendios-forestales-en-bolivia/>. [Último acceso: 2023].
- [2] Y. S. Praeli, «MONGABAY Periodismo Ambiental Independiente en Latinoamerica,» Junio 2020. [En línea]. Available: <https://es.mongabay.com/2020/06/latinoamerica-bosques-primarios-deforestacion-2019-brasil-bolivia-peru-colombia/>. [Último acceso: 2023].
- [3] SERMAP, «Servicio Nacional de Areas Protegidas,» 2020. [En línea]. Available: <http://sermap.gob.bo/sermap-prevenir-incendios-forestales-es-tarea-de-todos/>. [Último acceso: 2023].
- [4] M. Oswaldo, A. Huáscar, B. Mercedes , C. Marc , C. Roger , A. Sixto y F. Reynaldo , «APORTES A LA EVALUACION DE SEVERIDAD DE QUEMAS EN LA CHIQUITANIA INCENDIOS 2019: INTEGRANDO TRES ESTUDIOS DE CASO ALTA VISTA, LAGUNA MARFIL Y ÑEMBI GUASU,» 2020.
- [5] G. A. D. d. S. Cruz, «Gobierno Autonomo Departamental de Santa Cruz,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.santacruz.gob.bo/nota/san-ignacio-de-velasco-es-el-municipio-con-mayor-numero-de-incendios-forestales>. [Último acceso: 2023].
- [6] Statista, «Statista,» Enero 2022. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/1268107/america-del-sur-numero-de-incendios-forestales/>. [Último acceso: 2023].
- [7] E. CHUVIECO, FUNDAMENTOS DE TELEDETECCION ESPACIAL, ESPAÑA: RIALP S.A., 1995.
- [8] CANADÁ CENTRE FOR REMOTE SENSING, FUNDAMENTALS OF REMOTE SENSING, CANADA, 2015.
- [9] J. A. Richards y J. Xiuping , Remote Sensing Digital Image Analysis, 2006.
- [10] D. P. KOGUT, «EOS DATA ANALYTICS,» NOVIEMBRE 2021. [En línea]. Available: [https://eos.com/es/blog/teledeteccion/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20Es%20La%20Tel%20edetecci%C3%B3n%20Activa,%20y%20largas%20\(microondas\)](https://eos.com/es/blog/teledeteccion/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20Es%20La%20Tel%20edetecci%C3%B3n%20Activa,%20y%20largas%20(microondas)). [Último acceso: 2023].
- [11] A. D. E. Y. L. D. COLOMBIA, «EQUIPOS Y LABORATORIO DE COLOMBIA,» [En línea]. Available: <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/inicio>. [Último acceso: MARZO 2023].
- [12] D. C. L. MONTECINOS, FUNDAMENTOS BASICOS DE TELEDETECCION, 2019.
- [13] Lillesand y Kiefer, REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION, 1999.
- [14] K. Vo, M. Hernandez y N. Patel, «Electromagnetic Radiation,» 2023. [En línea]. Available: <https://chem.libretexts.org/>.

- [15] Nasa, Landsat 7 Science Data Users Handbook, 2011.
- [16] E. Suaste, «Accion del Espectro Electromagnetico visible como elemento de diagnostico medico,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.yumpu.com/es/document/read/15927083/accion-del-espectro-electromagnetico-visible-como-cinvestav>.
- [17] D. Pérez, «Laboratorio de Tectonica Andina UBA,» 2007. [En línea]. Available: [http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso\\_SR/Guia\\_Curso\\_sr\\_2007.pdf](http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf).
- [18] F. Sarria, Sistemad de Informacion Geografica.
- [19] V. Cadierno, «APLICACIÓN DE TELEDETECCIÓN PARA ESTIMACIÓN DE SEVERIDAD POST-INCENDIO,» 2021.
- [20] A. Ariza Pastrana, ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS EN LA ESTRUCTURA DEL PAISAJE POR INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE TELEDETECCIÓN, España, 2017.
- [21] O. Maillard, M. Flores y G. Michme, *Protocolo metodológico estandarizado para evaluar procesos de regeneración postincendio en los sistemas socioecológicos en la Chiquitania, Bolivia*, Santa Cruz, 2021.
- [22] C. Key y N. Benson, *Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio.*, 2006.
- [23] J. Moody, R. Shakesby, P. Robichaud, S. Canon y D. Martin, «Forest Service U. S. Departament of Agriculture,» 2013. [En línea]. Available: [https://www.fs.usda.gov/rm/pubs\\_other/rmrs\\_2013\\_moody\\_j001.pdf](https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_other/rmrs_2013_moody_j001.pdf). [Último acceso: Enero 2024].
- [24] Montorio Lloveria, Perez-Cabello, Garcia Martin, Vlassova y Fernandez, «LA SEVERIDAD DEL FUEGO: REVISION DE CONCEPTOS, METODOS Y EFECTOS AMBIENTALES,» *Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza (CUD)*, pp. 427-440.
- [25] R. Manuenda, «<https://profile.es/blog/que-es-un-algoritmo-informatico/>,» 2021. [En línea]. Available: <https://profile.es/blog/que-es-un-algoritmo-informatico/>. [Último acceso: 2023].
- [26] «<https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/18601059/helvia/aula/archivos/repositorio/250/354/html/Plan%204-6-09/criba.htm>,» [En línea]. Available: <https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/18601059/helvia/aula/archivos/repositorio/250/354/html/Plan%204-6-09/criba.htm>.
- [27] A. Llastarri, J. Vivancos, M. Grau y D. Vivancos, «<http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/>,» 1 ABRIL 2005. [En línea]. Available: <http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/>.
- [28] J. C. Jiménez Muñoz, J. A. Sobrino y G. Sòria, «uv.es,» julio 2021. [En línea]. Available: [https://www.uv.es/ucg/CURSO\\_TD4.pdf](https://www.uv.es/ucg/CURSO_TD4.pdf).

- [29] Gis&Beers, «Gis&Beers,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.gisandbeers.com/correccion-radiometrica-imagenes-satelite/#:~:text=La%20correcci%C3%B3n%20radiom%C3%A9trica%20es%20una,imperfecciones%20presentes%20en%20los%20p%C3%ADxels.>
- [30] S. J. Centro Nacional de Alta Tecnología, «La Revista Geográfica de América Central,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/6609#:~:text=La%20correcci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica%20es%20un,del%20sensor%20con%20la%20atm%C3%B3sfera.>
- [31] J. Cardenas, «networkianos.com,» Octubre 2013. [En línea]. Available: <https://networkianos.com/>. [Último acceso: 2022].
- [32] DataScience, «datascience.eu,» 2019. [En línea]. Available: <https://datascience.eu/>. [Último acceso: 2022].
- [33] J. Barrios, «Health Big Data,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.juanbarrios.com/>. [Último acceso: 2023].
- [34] D. Rodriguez, «Regresion de Vectores de Soporte,» Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.analyticslane.com/>.
- [35] L. Gonzales, «Aprende Inteligencia Artificial.,» Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://aprendeia.com/>.
- [36] M. Labrador, «Researchgate,» Enero 2012. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/259230060\\_Satelites\\_de\\_teledeteccion\\_para\\_la\\_gestion\\_del\\_territorio](https://www.researchgate.net/publication/259230060_Satelites_de_teledeteccion_para_la_gestion_del_territorio). [Último acceso: 2023].
- [37] I. EOS Data Analytics, «EOS Data Analytics,» 2013. [En línea]. Available: <https://eos.com/es/find-satellite/landsat-8/>. [Último acceso: 2023].
- [38] Franz, «El blog de Franz,» 2023. [En línea]. Available: <https://acolita.com/landsat-el-programa-de-imagenes-de-la-tierra-mas-antiguo/>. [Último acceso: 2023].
- [39] S. F. a. C. World, «USGS.gov,» [En línea]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-1>. [Último acceso: 2023].
- [40] G. HIELO, D. NEARY y P. ADAMS, «RESEARCHGATE,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/233499137\\_Effects\\_of\\_Wildfire\\_on\\_Soils\\_and\\_Watershed\\_Processes](https://www.researchgate.net/publication/233499137_Effects_of_Wildfire_on_Soils_and_Watershed_Processes).
- [41] F. LEONARDO, D. VEGA, L. ZHAO, M. CARDOZO y E. MACAO, *Global Fire Season Severity Analysis and Forecasting*, 2019.
- [42] P. González. [En línea]. Available: <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmTIPO=DOCUMENTOCOMUNICACIONCUENTA&prmID=39186>.

- [43] globalforestwatch, «globalforestwatch,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.globalforestwatch.org/>.
- [44] MMyA, «MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.mmaya.gob.bo/2023/08/incendios-forestales-reducen-este-ano-de-100-mil-a-11-mil-hectareas/>.
- [45] A. Kirsanov, I. Rozinkina, G. Rivin, D. Zakharchenko y A. Olchev, *Effect of Natural Forest Fires on Regional Weather*, 2020.
- [46] M. P. Kale, A. Mishra, S. Pardeshi, S. Ghosh, D. S. Pai y P. S. Roy, *Forecasting wildfires in major forest types of India*.
- [47] I. P. Tamayo, «Mongabay,» Seotiembre 2022. [En línea]. Available: <https://es.mongabay.com/2022/09/incendios-forestales-afectan-al-parque-nacional-noel-kempff-en-bolivia/>. [Último acceso: 2023].
- [48] S. Domenico, *Understanding Earth Observation*, Italia: Saltador Cham, 2016.
- [49] E. S. Agency, «European Space Agency,» 2009. [En línea]. Available: [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_ES/SEM6DYD3GXF\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM6DYD3GXF_0.html).
- [50] J. Hernández y D. Montaner, *PATRONES DE RESPUESTA ESPECTRAL*, 2009.

Alex Salcedo Ticona  
[salcedoticonaalex@gmail.com](mailto:salcedoticonaalex@gmail.com)  
Celular: 76566643



DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS  
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-1289/2024  
La Paz, 26 de abril de 2024

**VISTOS:**

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **19 de abril de 2024**, por **ALEX SALCEDO TICONA** con C.I. N° **6820479 LP**, con número de trámite **DA 693/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: "**DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SEVERIDAD PRODUCIDO EN LOS SUELOS POR INCENDIOS FORESTALES EN LA ZONA DE LA AMAZONÍA BOLIVIANA A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN SATELITAL "CASO SAN IGNACIO DE VELASCO"**", cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

**CONSIDERANDO:**

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el "*Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración*".

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece "*Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión*". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "*la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios*"

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: "*...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial*"

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: "*... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena*



*fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.*

**POR TANTO:**

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

**RESUELVE:**

**INSCRIBIR** en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SEVERIDAD PRODUCIDO EN LOS SUELOS POR INCENDIOS FORESTALES EN LA ZONA DE LA AMAZONÍA BOLIVIANA A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN SATELITAL "CASO SAN IGNACIO DE VELASCO"** a favor del autor y titular: **ALEX SALCEDO TICONA** con C.I. Nº **6820479 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/Im

Firmado Digitalmente por:  
Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI  
**CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO**  
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS**  
LA PAZ - BOLIVIA



Firma:



b6I0m4Tu4Ln63G

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB [www.senapi.gob.bo/verificacion](http://www.senapi.gob.bo/verificacion) Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CODIGO QR.



Oficina Central - La Paz  
Av. Montes, Nº 515,  
entre Esq. Uruguay y  
C. Batallón Illimani.  
Telfs.: 2115700  
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz  
Av. Uruguay, Calle  
prolongación Quijarro,  
Nº 29, Edif. Bicentenario.  
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba  
Calle Bolívar, Nº 737,  
entre 16 de Julio y Antezana.  
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto  
Av. Juan Pablo II, Nº 2560  
Edif. Multicentro El Ceibo  
Ltda. Piso 2, Of. 5B,  
Zona 16 de Julio.  
Telfs.: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca  
Calle Kilómetro 7, Nº 366  
casi esq. Urriolagoitia,  
Zona Parque Bolívar.  
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija  
Av. La Paz, entre  
Calles Ciro Trigo y Avaroa  
Edif. Santa Clara, Nº 243.  
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro  
Calle 6 de Octubre, Nº 5837,  
entre Ayacucho  
y Junín, Galería Central,  
Of. 14.  
Telf.: 67201288

Oficina - Potosí  
Av. Villazón entre calles  
Wenceslao Alba y San Alberto,  
Edif. AM. Salinas Nº 242,  
Primer Piso, Of. 17.  
Telf.: 72018160

