

**DETERMINACIÓN DE ÍNDICES AMBIENTALES DE VARIABILIDAD
CLIMÁTICA EN LA ZONA MINERA DEL DEPARTAMENTO DEL CESAR
MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES POR LA
TÉCNICA DE PERCEPCIÓN REMOTA**

**DONOBAN FAUBRICIO AREVALO ALVAREZ
C.C. 1.065.807.449**

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERIAS Y TECNOLOGICAS
INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR
2019**

**DETERMINACIÓN DE ÍNDICES AMBIENTALES DE VARIABILIDAD
CLIMÁTICA EN LA ZONA MINERA DEL DEPARTAMENTO DEL CESAR
MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES POR LA
TÉCNICA DE PERCEPCIÓN REMOTA**

DONOBAN FAUBRICIO AREVALO ALVAREZ

C.C. 1.065.807.449

Docente asesor: JOSÉ LUIS RODRIGUEZ CASTILLA

Proyecto de investigación

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERIAS Y TECNOLOGICAS
INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR**

2019

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
1. INTRODUCCION	11
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
3. JUSTIFICACIÓN	15
4. OBJETIVOS	19
4.1. OBJETIVO GENERAL	19
4.2. OBJETIVO ESPECIFICOS	19
5. MARCO REFERENCIAL.....	20
5.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION	20
5.2. MARCO TEORICO	23
5.2.1. Fundamentos Físicos de la Teledetección	23
5.3. MARCO CONCEPTUAL	37
5.4. MARCO CONTEXTUAL	38
5.5. MARCO LEGAL	40
6. MARCO METODOLOGICO	43
6.1. TIPO DE INVESTIGACION.....	44
6.2. NIVEL DE INVESTIGACION.....	45
6.3. POBLACION DE ESTUDIO	45
6.4. MUESTRA POBLACIONAL	45
6.6. DESARROLLO METODOLOGICO.....	46

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

6.6.1. ETAPA 1: Estimar los valores de los indicadores NDVI, SAVI y MSI requeridos en el área de estudio entre los años 1989 y 2017 para estimar el estado de la cobertura vegetal en el área de estudio.....	46
6.6.2. ETAPA 2: Calcular el índice de temperatura superficial en cada uno de los momentos del periodo de estudio para establecer el comportamiento de la temperatura.....	51
6.6.3. ETAPA 3: Analizar el comportamiento de la temperatura superficial en relación al estado de la vegetación mediante una correlación matemática. ..	57
6.6.4. ETAPA 4: Determinar los sectores con mayores valores en las variables de cambio climático estimadas en del Departamento del Cesar.....	59
7. RESULTADOS Y ANALISIS.....	60
7.1 ESTIMACION DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL.....	60
7.2. CALCULO DEL INDICE DE INTENSIDAD DE VEGETACION.....	66
7.3. CALCULO DEL INDICE DE ESTRÉS HIDRICO.....	70
7.4. CALCULO DEL INDICE DE VEGETACION AJUSTADO AL SUELO.....	74
7.5 ANALISIS DE CORRELACION.....	78
7.6. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL.....	79
7.6.1. INFLUENCIA DE LOS FENOMENOS CLIMATOLOGICOS.....	81
7.7. ESTIMACION DEL NDVI.....	83
7.8. ESTIMACION DE MSI.....	84
7.9. ESTIMACION DE SAVI.....	86
8.DETERMINACION DE ZONAS CON MAYORES VALORES.....	87
9. CONCLUSIONES.....	92
10. BIBLIOGRAFIA.....	95

11. ANEXOS	98
ANEXO A. Región escogida como la zona de estudio en la pagina de base de datos Geologica de los Estados Unidos (USGS) para su busqueda y posterior descarga.....	98
ANEXO B. Correccion atmosferica realizada al raster en el programa PCI Geomatic	98
ANEXO C. Cálculo del NDVI de una imagen satelital en la calculadora ráster del programa PCI Geomatic	99
ANEXO D. Propiedades del archivo (MetaData) del raster procesado en PCI Geomatic	99
ANEXO F. tabla de atributos con los valores del índice MSI 2017 en PCI Geomatic.....	100
ANEXO G. Cálculo de NDVI al corregimiento de Becerril 1989 en el programa PCI Geomatic	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de los sensores multiespectrales satelitales Landsat.....	31
Tabla 2. Resolución en metros de cada longitud de onda de los satélites Landsat (NASA).....	32
Tabla 3. Criterios de selección de las imágenes satelitales	47
Tabla 4. Imágenes satelitales Identificadas para el área de estudio.....	47
Tabla 5. Constantes de calibración de la banda térmica para el Landsat 5	56
Tabla 6. <i>Parámetros Landsat 5</i>	56
Tabla 7. Valores de correlación NDVI y TS	79
Tabla 8. Temperaturas Superficiales para la Zona minera del Cesar en °C	79
Tabla 11. Condiciones climatológicas en el mes de diciembre, Boletines de monitoreo Fenómeno el Niño y la Niña, IDEAM.	82
Tabla 12. NDVI para la zona minera del Departamento del Cesar.	83
Tabla 13. MSI para la zona minera del Departamento del Cesar.	85
Tabla 14. SAVI para la zona minera del Departamento del Cesar.....	86
Tabla 15. Valores máximos promedio de los Índices en cada municipio.	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro Electromagnético.....	26
Figura 2. Google maps y Documento “contexto minero del cesar”	39
Figura 3. Localización del área de estudio en el departamento del Cesar.	39
Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología del proyecto.....	44
Figura 5. Corrección atmosférica realizada a las imágenes en el programa PCI Geomatic.....	48
Figura 6. Calculo TOA (Top of Atmosferic).....	60
Figura 7. Cálculo de Temperatura de Brillo (BT).	61
Figura 8. Cálculo del NDVI.	61
Figura 9. Cálculo de la Proporción de vegetación (Pv).....	62
Figura 10. Cálculo de la Emisividad de la Superficie (E).	62
Figura 11. Cálculo de la Temperatura Superficial terrestre (TS) en el programa ArcGis.	63
Figura 12. Temperatura Superficial para la Zona minera del Cesar en °C 30/12/1989	64
Figura 13. Temperatura Superficial para la Zona minera del Cesar en °C 19/12/2014	64
Figura 14. Temperatura Superficial para la Zona minera del Cesar en °C 22/12/20	65

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

Figura 15. Temperatura Superficial para la Zona minera del Cesar en °C 24/12/2016	65
Figura 16. Temperatura Superficial para la Zona minera del Cesar en °C 27/12/2017	66
Figura 17. Cálculo del Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) en el programa Pci Geomatic.....	67
Figura 18. NDVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 30/12/1989	68
Figura 19. NDVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 19/12/2014	68
Figura 20. NDVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 22/12/2015	69
Figura 21. NDVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 24/12/2016	69
Figura 22. NDVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 27/12/2017	70
Figura 23. Cálculo del índice de estrés hídrico (MSI) en el programa PCI Geomatic.	71
Figura 24. MSI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 30/12/1989	72
Figura 25. MSI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 19/12/2014	72

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

Figura 26. MSI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 22/12/2015	73
Figura 27. MSI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 24/12/2016	73
Figura 28. MSI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 27/12/2017	74
Figura 29. Cálculo del Índice NDVI en la Zona minera del departamento del Cesar en el Programa PCI Geomatics.....	75
Figura 30. SAVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 30/12/1989	76
Figura 31. SAVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 19/12/2014	76
Figura 32. SAVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 22/12/2015	77
Figura 33. SAVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 24/12/2016	77
Figura 34. SAVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 27/12/2017	78
Figura 35. División municipal en la Zona minera del departamento del Cesar en 1989.	88

RESUMEN

El cambio climático es uno de los problemas de mayor importancia a resolver en el último siglo y ha provocado la necesidad de implementar diversos estudios que faciliten la identificación de los impactos ocasionados por estos. Una de las principales actividades que inciden en la alteración de la variabilidad climática y por consiguiente en el cambio climático es la minería de carbón a cielo abierto. La teledetección ha sido utilizada como una valiosa herramienta que nos permite establecer indicadores de degradación y conservación de los recursos naturales, entre las técnicas derivadas del manejo de datos de satélites multiespectrales, se destacan el empleo de los índices de variabilidad climática. En ese sentido, el presente proyecto de investigación consistió en el desarrollo de índices de evaluación de la cantidad y calidad de vegetación NDVI, MSI, SAVI y un índice de temperatura superficial TS, obtenidos de imágenes satelitales del programa LANDSAT del año 1989 y entre el periodo 2014 y 2017, en área de estudio se centro en la zona minera del Departamento del Cesar, se analizo el comportamiento de la temperatura superficial, se realizó una correlación entre la TS y el NDVI y por ultimo se determinaron los mayores valores de cada uno de los índices en los municipios que conforman el área de estudió. Entre Los resultados más destacados de la investigación están el incremento de temperatura superficial entre el año 1989 y 2017 de aproximadamente 5°C, se evidencio una correlación moderada entre la Temperatura superficial y el estado de la vegetación, en cuanto a las dinámicas de los índices NDVI, MSI y SAVI se presentó un deterioro considerable en las condiciones de la vegetación presente en el área influenciada por la actividad minera.

1. INTRODUCCION

La actividad minera a cielo abierto es uno de los mayores responsables de la degradación de los recursos naturales y el causante de las emisiones de contaminantes atmosféricos que inciden en el aumento de la temperatura superficial. El Departamento del Cesar es uno de los mayores productores de carbón en el país, alcanzando una producción del 48% del total nacional. (Información Minera de Colombia – Min energía, 2010)

La zona minera en el departamento del cesar se encuentra bajo control por una red de monitoreo encargada de determinar únicamente índices de calidad del aire como material particulado, por lo tanto, es necesario la implementación de métodos para el estudio y estimación de indicadores ambientales que proporcionen información sobre el estado de los recursos naturales, teniendo en cuenta lo anterior, encontramos tecnologías nuevas en el campo de análisis, como es la teledetección, que es una valiosa herramienta que nos ayuda a determinar indicadores de degradación y conservación de los recursos naturales, un aporte destacado de la teledetección espacial al estudio medioambiental es su capacidad de seguir procesos dinámicos ya que las imágenes se captan por un sensor que observa la tierra desde una órbita estable y repetitiva. (Chuviecco, 1998)

Hasta el momento no se ha efectuado un análisis satelital que permita observar el estado de recursos naturales tal como; la cobertura vegetal, la calidad del suelo y un indicador de variabilidad climática como la temperatura superficial en la zona minera del Departamento del Cesar. De esta manera se evidencia la necesidad de realizar un estudio implementando las técnicas de percepción remota destacando la determinación de un Índice de Vegetación Diferencial Normalizado NDVI, Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI, Índice de Estrés Hídrico MSI y Temperatura Superficial TS, aplicados a imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8 adquiridas entre los años 1989 y 2017.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo de las actividades mineras tiene grandes impactos sobre diferentes ámbitos, especialmente en el medio ambiente, afectándolo en grandes proporciones tanto paisajístico como climáticamente.

La alteración del microclima (el clima en un área puntual) en la zona de explotación minera se debe principalmente a la ausencia o cambio de la cobertura vegetal, esto como consecuencia de la adecuación de los terrenos de explotación a cielo abierto, principalmente en la etapa de remoción de la cobertura vegetal y efectos de la contaminación emitida.

La industria minera emite los principales gases, partículas sólidas y líquidas retenedores de calor a la atmósfera. (IPCC, 2007)

En la actualidad existen controversias acerca del impacto socio ambiental producido por la explotación minera a cielo abierto. Según el Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina, existen en la actualidad 154 conflictos registrados en los países latinoamericanos que involucran 184 proyectos mineros y 222 comunidades. Del total de conflictos en la región, 16 están en el territorio colombiano. En nuestro país existen actualmente 19 proyectos en fase de explotación (en los departamentos de La Guajira, Cesar, Córdoba, Antioquia, Quindío, Santander, Risaralda y Boyacá) y más de 100 proyectos en fase de exploración, con un crecimiento en la última década en el número de proyectos mineros con más de 9000 títulos mineros inscritos en el Registro Minero Nacional (Ministerio de Minas y Energías. 2016).

En la zona norte de Colombia los proyectos de carbón a cielo abierto en Guajira y Cesar, representan el 86.6 % de la producción carbonera del país. La minería a cielo abierto inicio en el departamento del Cesar en el año 1995 convirtiendo esta actividad en el principal reglón económico de la región. (ANLA. 2012) A pesar de esto, los beneficios económicos y el desarrollo regional del cual ha sido motor, es

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

empañado por el impacto ambiental y los cambios generados en su zona de influencia poniendo en riesgo áreas de gran importancia ambiental y cultural. De esta forma se pretende implementar el uso de tecnologías de teledetección para el cálculo de indicadores ambientales que proporcionen información sobre los cambios que se han ido presentando en la zona minera desde que iniciaron las actividades de explotación. Los indicadores derivados de imágenes de sensores remotos permiten construir sistemas de indicadores ambientales eficientes y a más bajo coste para la toma de decisiones. (Santana, Escobar & Capote. 2010)

Esta investigación tiene un alcance de tipo exploratorio, el cual pretende obtener variables ambientales de cambio climático en la zona minera del Departamento del Cesar a través del análisis visual de imágenes satelitales del área de estudio que sirvan para la determinación del estado y la calidad de los recursos naturales y ambientales de la región. De esta forma poder evidenciar la diferencia de los indicadores de variabilidad climática por medio de una comparación entre las imágenes estudiadas en los diferentes años, también poder tener un registro detallado de las zonas más afectadas por la actividad minera.

Este proyecto se limita netamente a la determinación de indicadores de variabilidad climática de la zona minera central del departamento del Cesar, dejando a un lado la determinación de estos índices a nivel departamental, regional y nacional. Solo será utilizado como una herramienta de estudio y no como una solución a los efectos negativos causados por la actividad minera, sin embargo, sí permite demostrar la situación actual para la realización a futuro de un plan de acción para mitigar y/o reparar los posibles daños ocasionados, que demuestre este estudio.

Pero ¿Cómo podrían estudiarse variables ambientales de cambio climático mediante el procesamiento de imágenes satelitales que contengan un mayor

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

tamaño muestral del área de estudio e implique un menor coste de implementación?
¿Podrían las técnicas de análisis visual ayudar en la estimación de variables ambientales de cambio climático a partir de imágenes satelitales del Departamento del Cesar?, en base a estas preguntas se enmarca el problema a estudiar y se convierten en el punto de partida de esta investigación.

3. JUSTIFICACIÓN

En aspectos científicos, la importancia de mantener un ecosistema de convergencia económica, social y ambiental requiere de rigor científico para la implementación de un sistema de procesamiento de imágenes por percepción remota desde satélites, lo que constituiría un esfuerzo entre lo académico con instituciones de protección ambiental a fin de diseñar un esquema de implementación laboral en base al sistema de manejo operativo de los programas requeridos para tal efecto. Aunado a ello, la investigación propone una evaluación detallada sobre el estudio de los índices ambientales de variabilidad climática, enfatizando en la determinación de la temperatura superficial y el estado de la calidad de la vegetación, por nombrar algunos casos que se pueden mencionar en esta investigación, en el cual se describen los procedimientos que deben efectuarse para el correcto análisis de los datos y sustentado por autores que sugieren un modelo realizado.

En cuanto a la importancia económica que sostiene la cobertura de los desastres climáticos que origina la actividad de explotación minera a cielo abierto, es que los programas de saneamientos suele ser muy costosos y llevan años de recuperación, por lo tanto el mantenimiento de los proyectos de saneamientos y corrección de suelos requiere de un sistema de prevención así como de soporte de información que optimicen el trabajo minero a menor contaminación exponencial, con un sistema de procesamiento de imágenes satelitales por la técnica de percepción remota.

Según corresponde su incidencia política, repercute en un acuerdo de alcance socio-económico el cual se conllevan propuestas de mejora ambiental con el deber del Estado en mantener la consecución de proyectos de saneamiento ambiental, por lo cual las empresas llevan a cabo su estructura operativa de recuperación ambiental mientras otras no cuentan con suficientes recursos para mantener tales

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

actividades por muchos años, siendo una actividad económica primordial para el Departamento del Cesar, en el cual se puede aprovechar la implicación de los avances tecnológicos para desarrollar programas interinstitucionales de innovación laboral.

Su repercusión social es un factor indispensable, siendo principalmente afectados las comunidades que puedan habitar alrededor de los terrenos que ya son afectados por la contaminación atmosférica y en terrenos por la explotación minera, quienes también se ven afectados por los índices de precipitación y recorridos fluviales, se optimizan al actualizar las bases de datos mediante los programas señalados y lograr un posible asentamiento de comunidades que ejerzan actividades comerciales y socio culturales, aprovechando los climas y espacios turísticos que se encuentran en los alrededores de centros mineros ubicados en zonas específicas donde no sean afectados por la variabilidad climática y puedan ejercer una vida tranquila.

De acuerdo con la relevancia tecnológica, se propone el implemento de un programa específico en lectura de imágenes satelitales, cuyo manejo de herramientas hace necesario de un conocimiento especializado en su control y determinado a seguir una serie de funciones para alcanzar los objetivos propuestos, por lo que su proceso de implementación puede ser apreciada como la innovación tecnológica en materia de observación de variabilidad climática que beneficie el trabajo de minería y solvente en su esquema de trabajo las inquietudes sociales, laborales, ambientales y socioculturales.

El estudio se basa en una recopilación de información sobre el manejo de los programas específicos como ArcGis y PCI Geomatics que funcionan como programas de corrección de las imágenes satelitales que permitan ajustar los datos

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

a fin de precisar los factores que puedan dificultar la operación minera, así como buscar mejorar la calidad ambiental que se compromete con tales actividades y se puedan estudiar mediante NDVI, SAVI, MSI, TS, y conocer los sectores con mayores fluctuaciones en variabilidad climática dentro del Departamento para poder gestionar un plan de mejora y desarrollo social a futuro, evaluando los riesgos sociales por causa medioambiental y optimizar las operaciones mineras hacia el resto del país.

La Zona Minera del Cesar ha tenido transformaciones que han cambiado las dinámicas de las funciones naturales de los ecosistemas debido al desarrollo económico que se ha dado en la región, marcado por las actividades productivas intensivas por el auge de la minera de carbón a cielo abierto convirtiendo la actividad minera en el principal renglón económico de la región. (ANLA. 2012). A pesar de esto, los beneficios económicos y el desarrollo regional del cual ha sido motor, es empañado por el impacto ambiental y el cambio climático generado en su zona de influencia poniendo en riesgo áreas de gran importancia ambiental y cultural. Por estas razones, y para contrarrestar esta situación, La zona minera del Cesar cuenta con un “Sistema Especial de Vigilancia de la Calidad del Aire de la Zona Carbonífera del Cesar” SEVCAZCC (MADS, 2010) la cual cuenta con una red conformada por 14 estaciones de monitoreo. Tres (3) de las cuales pretenden evaluar el efecto del tráfico vehicular y once (11) estaciones se encuentran en zonas residenciales de municipios y corregimientos. Sin embargo, estos datos solo permiten determinar el índice de calidad de aire de la zona de influencia a partir de muestras puntuales dejando a un lado la estimación de variables que permitan la evaluación de la calidad de la vegetación y el estudio del suelo, y de las cuales no existen datos por parte de las autoridades oficiales para la modelación de la contaminación atmosférica del área de afectación directa.

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

Actualmente en el Departamento del Cesar se cuenta con estaciones de monitoreo de variables ambientales en zonas de influencia minera, ubicadas en distintos puntos del área de explotación de minerales y que comprende los municipios de El Paso, La Jagua De Ibirico, Chiriguaná, Becerril y Codazzi. Así pues, con este proyecto se pretende utilizar técnicas existentes en el campo del análisis visual que sirvan como forma alternativa para la determinación y seguimiento de variables ambientales de cambio climático en el Departamento del Cesar a partir de imágenes satelitales, abriendo la puerta a su aplicabilidad en los municipios adyacentes a la zona de influencia directa y de todo el departamento, y en un futuro plantear la elaboración de un mapa que registre los valores de las variables estimadas a través de los índices NDVI, SAVI, MSI y TS a nivel departamental, regional y/o nacional con la posibilidad del establecimiento de una comparación multitemporal de la calidad de los recursos naturales y ambientales.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar los índices ambientales de variabilidad climática en la zona minera del Departamento del Cesar mediante el procesamiento de imágenes satelitales por la técnica de percepción remota.

4.2. OBJETIVO ESPECIFICOS

- Estimar los valores de los indicadores NDVI, SAVI y MSI requeridos en el área de estudio entre los años 1989 y 2017 para estimar el estado de la cobertura vegetal en el área de estudio.
- Calcular el índice de temperatura superficial en cada uno de los momentos del periodo de estudio para establecer el comportamiento de la temperatura.
- Analizar el comportamiento de la temperatura superficial en relación al estado de la vegetación mediante una correlación matemática.
- Determinar los sectores con mayores valores en las variables de cambio climático estimadas en del Departamento del Cesar.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION

- Manuel Miller. (2017)

Series Temporales de Imágenes de Satélite, para el análisis del cambio de vegetación, en un Contexto de Explotación Minera a Cielo Abierto.

Se evaluaron los cambios en una serie temporal de productos NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), obtenidos de imágenes satelitales del programa LANDSAT, periodo 1991 – 2015. El área de estudio abarca parte del entorno de la mina Pierina en Perú. Los NDVI fueron clasificados con un árbol de decisión, de acuerdo con criterios estadísticos y de interpretación visual de imágenes de elevada resolución espacial. Se cuantificaron los cambios temporales de las clases y analizaron las tendencias. Las clases “Vegetación Densa” y “Vegetación Escasa” mostraron un aumento, particularmente en los últimos años, en detrimento de la clase “Suelo Descubierta”.

- Ing. Agr. Carlos Gonzaga Aguilar. (2014)

Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador.

Las variaciones de las coberturas vegetales en la superficie terrestre, en determinados periodos de tiempo, son un importante indicador ambiental que ha sido empleado en diferentes ámbitos, desde estudios relacionados a las dinámicas de los ecosistemas, hasta la orientación en la toma de decisiones en temas de planificación del territorio ligadas al desarrollo. La teledetección ha sido utilizada como valiosa herramienta y determinante a la hora de establecer indicadores de degradación y conservación de los recursos naturales, de manera especial en

evaluar dinámicas en los cambios de usos de suelo y coberturas vegetales; entre las técnicas derivadas del uso de datos satelitales multiespectrales, se destacan el empleo de los índices de vegetación. En ese sentido, el presente estudio consistió en la evaluación de tres índices de vegetación, como estimadores de cambios de diferentes tipos de cobertura vegetal en la provincia de Loja al sur de Ecuador. Los índices empleados fueron: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI, Índice de Estrés Hídrico MSI y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI, aplicados a imágenes provenientes de dos sensores, Landsat 7 ETM+ y ASTER.

- Santiago Trujillo Uribe. (2012)

ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA SUPERFICIAL EN EL VALLE DE ABURRÁ MEDIANTE TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

Utilizando imágenes satelitales Landsat entre los años 1986 y 2010, se estimó la temperatura superficial (TS) del valle de Aburrá y sus zonas rurales cercanas. Luego de estimar la temperatura se calculó el índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), el cual es un indicador de la presencia de vegetación, con el fin de correlacionar estas dos variables y establecer la influencia de la vegetación en la temperatura superficial. Las estimaciones indicaron que el área urbana presenta una temperatura superior al área rural circundante, obteniéndose índices de isla de calor urbana (diferencia entre los promedios en ambas zonas).

- Ramos C.S.; Marchetti C.F., Apellaniz M.; y Graziano M. (2010)

LA ALUMBRERA BAJO TELEDETECCIÓN: ANÁLISIS TEMPORAL DE LA VEGETACIÓN DE UNA MINA A CIELO ABIERTO EN LA PROVINCIA DE CATAMARCA, ARGENTINA.

existen controversias acerca del impacto socio ambiental de la explotación minera a cielo abierto, junto con una tendencia creciente en el número de proyectos mineros a cielo abierto en el país. El gran consumo hídrico que demandan estas

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

explotaciones es clave en zonas áridas dado que puede afectar la disponibilidad de agua, pudiendo alterar la productividad de los sistemas vegetales. En este trabajo se analizaron los cambios en la vegetación ocurridos a partir de la instalación de una mina a cielo abierto en la región de Bajo la Alumbraera, Provincia de Catamarca, a través de la utilización de imágenes satelitales (Landsat 5TM) y el uso del NDVI como índice de vegetación. Se observó una disminución del NDVI a partir del comienzo de la explotación y una correlación negativa con el tiempo en todas las áreas analizadas alrededor del yacimiento, con un mayor efecto en el anillo de 4-10km, sugiriendo un impacto sobre la vegetación más allá de la zona en explotación. Estos resultados, no contemplados en el informe de impacto ambiental, marcan la necesidad de exigir informes de impacto ambiental más adecuados para tomar mejores decisiones en la conservación del ambiente y los modos de vida local.

- Luis Marino Santana Rodríguez, Luis Alfonso Escobar Jaramillo y Paolo Andrés Capote. (2009)

Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite.

se propone un modelo para obtener un índice de calidad ambiental (ICA) urbano, a partir de imágenes satelitales. De una imagen Landsat ETM+ de Cali, Colombia se obtuvieron cinco indicadores ambientales: temperatura de superficie (TS), y los índices de vegetación normalizado (NDVI), de humedad en las hojas (LWCI), de suelos normalizado (NSI) y de vegetación ajustado al suelo (SAVI), con los que se estimó el ICA a nivel de barrio, usando análisis multivariado. Principalmente se obtuvo una alta correlación entre los indicadores; que los mayores valores del ICA ocurren en barrios con menor área construida y viceversa, y diferencias estadísticas significativas del ICA, según el uso del suelo. Los barrios fueron agrupados según el índice, destacando aquellos que demandan intervención prioritaria por las entidades de planificación.

5.2. MARCO TEORICO

5.2.1. Fundamentos Físicos de la Teledetección

5.2.1.1 El espectro electromagnético.

La teledetección es la técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. El sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. Ese flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite posteriormente a las estaciones receptoras. Entre superficie y sensor se interpone la atmósfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original. De igual forma la observación remota puede basarse en energía emitida por las propias cubiertas, o en la que podríamos enviar desde un sensor que fue capaz, tanto de generar su propio flujo energético, como de recoger posteriormente su reflexión sobre la superficie terrestre.

la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético. Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: Longitud de onda (λ) y frecuencia (ν). La primera hace referencia a la distancia entre los picos sucesivos de una onda, mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo. a mayor longitud de onda – o menor frecuencia- el contenido energético será menor y viceversa. Esto implica que la radiación en longitudes de onda larga es más difícil de detectar que aquella proveniente de longitudes cortas, de ahí que las primeras requieran medios de detección más refinados.

podemos definir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen

establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electromagnético. Comprende desde las longitudes de onda más corta (rayos gama, rayos X), hasta kilométricas (telecomunicaciones). **Figura 1**

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar, una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual. Su denominación y amplitud varían según distintos autores, si bien la terminología más común es la siguiente:

Espectro visible (0,4 a 0,7 μm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región, suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (A: 0,4 – 0,5 μm), verde (V: 0,5 – 0,6 μm), y rojo (R: 0,6 – 0,7 μm), es la única porción del espectro que podemos asociar al concepto de color.

Infrarrojo: cubre la región entre 0.7 y 100 μm , esta porción puede subdividirse en dos categorías basadas en las propiedades de la radiación: IR Reflejado y el IR térmico o emitido. El primero es utilizado en teledetección de manera similar al visible, y el IR térmico es diferente al visible e IR reflejado, ya que esta energía es esencialmente la radiación emitida por la superficie de la tierra en forma de calor.

Infrarrojo cercano (IRC: 0,7 a 1,3 μm) también se denomina infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales.

Infrarrojo medio (IRM: 1,3 a 8 μm). En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. En el primer caso, hablamos de infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR), que se sitúa entre 1,3 y 2,5 μm y resulta una región idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La segunda región de interés está comprendida entre 3 y 5 μm , y suele denominarse más propiamente como infrarrojo medio (IRM), siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios o volcanes activos).

Infrarrojo lejano o térmico (IRT: 8 a 14 μm), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

Microondas (M, por encima de 1 mm), con gran interés por ser un tipo de energía transparente a la cubierta nubosa (Chuvienco, 2002)

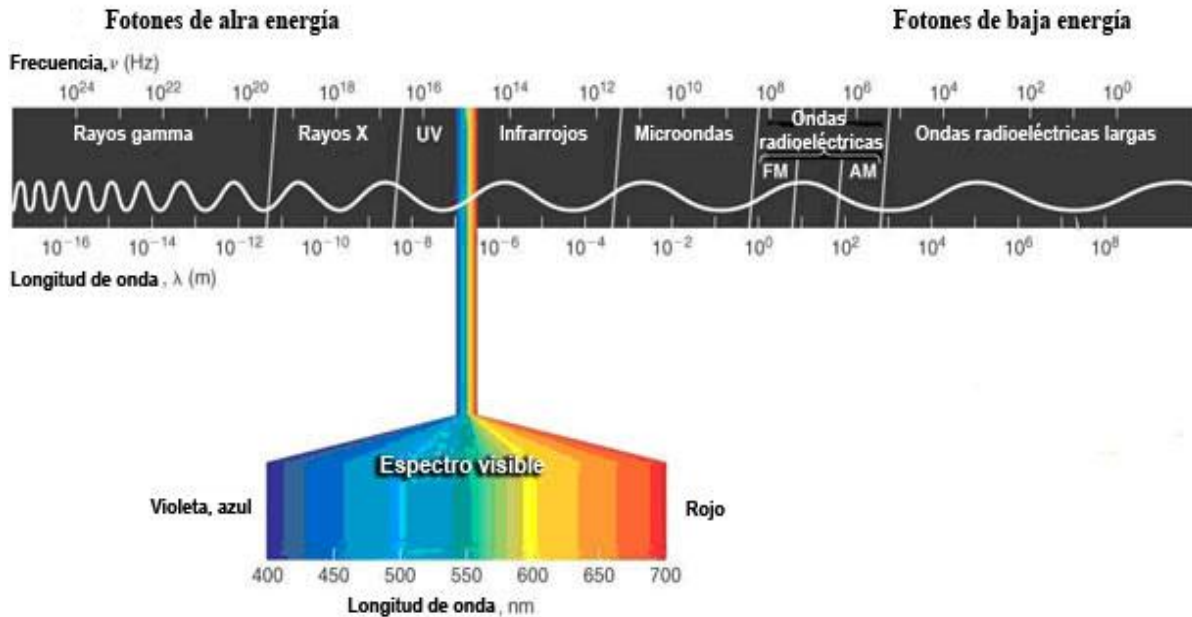


Figura 1. Espectro Electromagnético

Fuente: Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, Light Sensitivity (2008), 3. Scientific Rationale, p. 10

5.2.1.2. Radiación electromagnética.

La radiación electromagnética es una forma de energía que se propaga mediante ondas que se desplazan en el vacío a la velocidad de la luz (300000 Km/s) transportando cantidades discretas de energía. (Sigmur, 2006).

Para que pueda producirse una observación remota de la superficie terrestre es preciso que el sensor detecte un flujo energético proveniente de esta. Este flujo tiene una intensidad determinada, proveniente de, o dirigida a, una unidad de superficie y con una dirección concreta, así, la radiancia se considera como el total de energía radiada en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Es un término fundamental en teledetección, ya que describe

precisamente lo que mide el sensor, se cuantifica en vatios por metro cuadrado y estéreo-radián ($W/m^2 sr^{-1}$) (Chuvienco, 2008)

para la identificación de objetos y procesos en la superficie terrestre, lo que nos interesa es la reflectividad (relación entre el flujo incidente y el que refleja una superficie) de estos objetos respecto a las diferentes longitudes de onda. Cada tipo de material, suelo, vegetación, agua, etc. reflejará la radiación incidente de forma diferente lo que permitirá distinguirlo de los demás si medimos la radiación reflejada. A partir de medidas de laboratorio se ha obtenido la reflectividad para las distintas cubiertas en diferentes longitudes de onda. El gráfico que, para cada longitud de onda, nos da la reflectividad se denomina firma espectral y constituye una marca de identidad de los objetos. Resulta así fácil por ejemplo distinguir entre suelo y vegetación, e incluso entre diferentes tipos de suelo o diferentes tipos de vegetación.

El agua, al ser el único elemento superficial capaz de transmitir radiación hacia abajo, tiene una reflectividad muy baja, aunque muy dependiente de la longitud de onda. Absorbe casi toda la radiación que le llega en las bandas del infrarrojo próximo y medio. La reflectividad aumenta algo en el visible especialmente en las bandas del azul y el verde. La turbidez del agua contribuye al aumento de la reflectividad en el verde y en el infrarrojo reflejado. La eutrofización del agua aumenta su reflectividad en el verde.

La vegetación tiene una reflectividad baja en el visible, aunque con un pico en el color verde, la clorofila absorbe el rojo y el azul reflejando más en el verde. La reflectividad es muy alta en el infrarrojo reflejado o próximo debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En el infrarrojo medio

hay una disminución especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que el agua contenida en la planta absorbe la energía.

Esta curva tan contrastada se debilita en el caso de la vegetación enferma en la que disminuye el infrarrojo y aumenta la reflectividad en el rojo y azul. Se observa también que la reflectividad de una planta depende de su contenido en agua. Cuando el contenido de agua aumenta disminuye la reflectividad ya que aumenta la absorción de radiación por parte del agua contenida en la planta.

Finalmente, el suelo tiene una reflectividad relativamente baja para todas las bandas, aunque aumentando hacia el infrarrojo. La firma espectral es más simple que en el caso de la vegetación. Sin embargo, la reflectividad del suelo va a depender mucho de la composición química y mineralógica, la textura y del contenido de humedad. (Sigmur, 2006).

5.2.1.3. La influencia de la atmosfera sobre la teledetección

Al atravesar la atmósfera terrestre, la energía de ciertas longitudes de onda de la radiación solar se reduce considerablemente como ocurre con gran parte de la energía ultravioleta (0.001 a 0.4 μm) y algunas porciones del espectro infrarrojo (0.75 a 2.5 μm). En días de mucha nubosidad, la dilución atmosférica de energía en esas longitudes de onda es aún mayor (Chinea, 2002).

La atenuación atmosférica, siendo un efecto de la atmosfera es producido principalmente por la presencia de partículas en suspensión. Las partículas, según su tamaño, afectan distintas longitudes de onda. Las nubes son el mayor obstáculo, las cuales pueden ocultar por completo el suelo, aunque cuando son tenues también afectan la transmisión de luz de una manera distinta según las longitudes de onda.

Partículas mucho más pequeñas afectan las longitudes de onda más cortas, y son particularmente comunes los casos de bruma. La facilidad de dispersión de la luz de este color es la que hace que el cielo diurno sea azul.

5.2.1.4. Imágenes satelitales

Una imagen satelital es el producto obtenido por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial a través de la captación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por un cuerpo celeste; producto que posteriormente se transmite a 30 estaciones terrestres para su visualización, procesamiento y análisis. Existen diferentes tipos de imágenes satelitales, dependiendo del tipo de sensor. Desde las primeras cámaras fotográficas montadas en satélites en la década de los 60 hasta los más sofisticados y sensibles sensores hiperespectrales. Existe una amplia gama de tipos de imágenes satelitales que hoy se utilizan en las más diversas áreas, dependiendo de su resolución espacial, así como de la información espectral que poseen; desde el espionaje militar, el monitoreo del cambio climático, monitoreo de incendios e inundaciones, seguimiento de huracanes y tifones, evaluaciones multiespectrales de vegetación etc. (Bense, 2007).

La información de la radiación solar reflejada o emitida por la superficie terrestre es capturada por el sensor y registrada en formato digital. Las imágenes se componen de una matriz regular o rejilla de celdas o píxeles. El valor numérico de cada píxel se define en función de la radiancia recibida por el sensor para esa porción de superficie, el cual se denomina nivel digital (ND). Una imagen se forma por determinadas bandas según la energía recibida en longitudes de onda específicas del espectro electromagnético.

5.2.1.5. Procesamiento de las imágenes satelitales

El procedimiento de procesamiento de las imágenes satelitales, consiste en realizar las respectivas correcciones de las imágenes, con el propósito de eliminar cualquier error o anomalía detectada en la imagen, puede ser de tipo geográfica o radiométrica de los píxeles que la componen.

Cualquier imagen adquirida por un sensor remoto, presenta una serie de alteraciones radiométricas y geométricas debidas a muy variados factores, en el caso concreto de las imágenes espaciales, las deformaciones más frecuentes pueden agruparse en 4 grupos: (Chuvieco, 2008).

- Distorsiones originadas por la plataforma.
- Distorsiones provocadas por la rotación terrestre.
- Distorsiones por el sensor.
- Distorsiones provocadas por la atmósfera.

Estas distorsiones, deben ser comprendidas para procesar los datos adecuadamente para posteriores análisis e interpretaciones. Consecuentemente la radiancia registrada por el sensor no es una representación exacta de la radiancia efectivamente reflejada por las coberturas. Esto significa que la imagen adquirida en formato numérico presenta una serie de anomalías con respecto a la escena real detectada. Estas anomalías están en la localización de los píxeles que componen la matriz de datos. Las operaciones de corrección pretenden minimizar estas alteraciones. Como producto se obtiene una imagen corregida que es lo más próximo posible, geométrica y radiométricamente, a la verdadera energía radiante y características espaciales del área de estudio (APN, 2005)

5.2.1.6. Características de los satélites Landsat 5 y Landsat 8

A finales de los años 60 la agencia espacial norteamericana (NASA) desarrollo el primer proyecto dedicado exclusivamente a la observación de los recursos naturales terrestres; el 23 de Julio de 1972 fue puesta en órbita el primer satélite de la serie ERTS (Earth Resource Technology Satellite) el cual fue llamado también como Landsat a partir del segundo lanzamiento en 1975 (Landsat 2).

El programa Landsat es considerado el más Provechoso entre los satélites de recursos ya que ha proporcionado datos multiespectrales de alta resolución a una amplia gama de usuarios por más de 25 años, este representa el registro más largo de información sobre la superficie terrestre obtenido de forma global y repetitiva desde el espacio, Las características de los sensores del proyecto Landsat están descritos en la **Tabla 1** y **Tabla 2**.

Tabla 1. Características de los sensores multiespectrales satelitales Landsat

Sistema	Lanzamiento (fin de uso)	Instrumento	Resolución espacial (metros)	Alt (km)	R (Días)
Landsat1	(7/23/1972)	RBV	80	917	18
	(1/6/1978)	MSS	80		
Landsat2	1/22/1975	RBV	80	917	18
	(2/25/1982)	MSS	80		
Landsat3	03/05/1978	RBV	40	917	18
	(03/31/1983)	MSS	80		
Landsat 4	7/16/1982	MSS	80	705	16
		TM	30		
Landsat 5	03/01/1984	MSS	80	705	16
		TM	30		

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

Landsat 6	10/05/1993 (10/05/1993)	ETM	15 (pan) 30(MSS)	705	16
Landsat 7	01/04/1999	ETM+	15 (pan)	705	16
Landsat 8	(11/02/2013)	ETM	15(pan)	705	16

Fuente: NASA, 2007

Tabla 2. Resolución en metros de cada longitud de onda de los satélites Landsat (NASA)

Satélite	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial (metros)	Satélite	Longitud de onda (nm)	Resolución espacial (Metros)
Landsat 5 TM	(1) 0,45 a 0,52	30	Landsat 8	(1) 300	30
	(2) 0,52 a 0,60	30		(2) 450 a 510	30
	(3) 0,63 a 0,69	30		(3) 530 a 590	30
	(4) 0,76 a 0,90	30		(4) 640 a 670	30
	(5) 1,55 a 1,75	30		(5) 850 a 880	30
	(6) 10,4 a 12,5	120		(6) 1570 a 1650	30
				(7) 2110 a 2290	30
				(8) 500 a 680	15
				(9) 1360 a 1380	30
				(10) 10600 a 11190	100(*30)
				(11) 11500 a 12510	100(*30)

Fuente: NASA, 2007

5.2.1.7. Calidad Ambiental.

La calidad ambiental puede definirse como la condición de equilibrio natural que describe el conjunto de procesos geoquímicos, biológicos y físicos, y sus diversas y complejas interacciones, que tienen lugar a través del tiempo, en un sistema ambiental general dentro de un espacio geográfico dado, sin o con la mínima intervención del ser humano (Presidencia de la Republica de Colombia, 2004). En dichos procesos intervienen una serie de variables que afectan de una u otra forma la interacción de estos con el equilibrio natural y que pueden ser estimadas a través de índices ya especificados y de gran utilidad para evaluar el estado de la calidad ambiental en zonas de interés. Entre los índices que permiten la estimación de estas variables, tenemos:

Los índices de vegetación, o índices verdes, son transformaciones que implican efectuar una combinación matemática entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen. (Esperanza y Zerda, 2002).

El desarrollo de estos índices obedeció a la observación de la consistencia de la respuesta a la reflectancia de la luz roja e infrarroja de la vegetación verde: a mayor cantidad de clorofila, mayor absorción de la luz incidente roja; a mayor volumen foliar, mayor reflectancia de la luz infrarroja cercana. Considerando que pueden existir otras coberturas con alta reflectancia en el infrarrojo, u otras con alta absorción en el rojo, el empleo de solo una banda puede conducir a errores. Sin embargo, solo la vegetación viva produce invariablemente ambas respuestas, de modo que, si se calcula el cociente Los índices de vegetación, o índices verdes, son transformaciones que implican efectuar una combinación matemática entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen. (Esperanza y Zerda, 2002). El desarrollo de estos índices obedeció a la observación de la consistencia de la respuesta a la reflectancia de la luz roja e

infrarroja de la vegetación verde: a mayor cantidad de clorofila, mayor absorción de la luz incidente roja; a mayor volumen foliar, mayor reflectancia de la luz infrarroja cercana. Considerando que pueden existir otras coberturas con alta reflectancia en el infrarrojo, u otras con alta absorción en el rojo, el empleo de solo una banda puede conducir a errores. Sin embargo, solo la vegetación viva produce invariablemente ambas respuestas, de modo que si se calcula el cociente

5.2.1.7.1. Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI)

Es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. es el índice de vegetación más utilizado para todo tipo de aplicaciones. (Rouse et al. 1974) La razón fundamental es su sencillez de cálculo, y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y $+1$), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes, etc. Respecto a otros índices de vegetación más complejos, el NDVI tiene las ventajas de tener una gran sencillez de cálculo y de facilitar la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación. Además, permite la comparación entre datos obtenidos por diferentes investigadores. Por otro lado, tiene el inconveniente de que posee poca capacidad de minimizar la influencia del suelo y de la atmósfera. El NDVI permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como, la evolución de su estado a lo largo del tiempo. Esto está determinado fundamentalmente por las condiciones climáticas. La interpretación del índice debe, asimismo, considerar los ciclos fenológicos y de desarrollo anual, para distinguir oscilaciones naturales de la vegetación con los cambios en la distribución temporal y espacial, causados por otros factores.

- El agua tiene reflectancia mayor en el infrarrojo que en el rojo, por lo tanto, valores negativos de NDVI.

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

- El suelo descubierto y con vegetación rara presenta valores positivos, aunque no muy elevados.
- La vegetación densa, sana y bien desarrollada presenta los mayores valores de NDVI.
- Las nubes presentan valores similares en el R e IRC, por lo que su NDVI es cercano a 0.

5.2.1.7.2. Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI).

trata de corregir el efecto del suelo en el valor del índice. (Huete, 1988)

En la firma espectral de los suelos se observa que su reflectividad es similar en las bandas roja e infrarroja cercana. También, al cambiar las condiciones del suelo la reflectividad aumenta o disminuye simultáneamente en ambas bandas. Así, un suelo húmedo refleja menos en el rojo, pero también menos en el IRC, y un suelo seco refleja más en ambas bandas. Si en un punto concreto no hay vegetación, ese punto se representará sobre la línea del suelo. Pero si hay una cierta cantidad de vegetación, la reflectividad de esa zona en el rojo será más baja que la del suelo desnudo, y en el infrarrojo será más alta, por lo que el punto quedará representado alejado de la línea del suelo. Cuanto más lejos esté de la línea del suelo, más vegetación habrá en el pixel; por eso, se toma como una medida de la cantidad de vegetación

5.2.1.7.3. Temperatura de superficie (TS).

los sensores térmicos infrarrojos, que logran detectar la temperatura superficial de un cuerpo por medio de la radiación solar reflejada y el calor emitido. El segmento infrarrojo de la luz tiene una longitud entre los 0.7 a 100 μm , pero para la percepción remota se utilizan tres segmentos de interés que se encuentran en este rango: cercana a la infrarroja (0.7-1.3 μm), infrarroja media (1.3-3.0 μm) e infrarroja lejana

(7.0-15 μ m), siendo este último segmento el utilizado para detectar la temperatura, por lo que también se le conoce como banda térmica infrarroja (NASA, 2007).

Entre los sensores que pueden obtener imágenes térmicas se encuentran los satélites Landsat 5 y 7. Landsat 5 proporciona una resolución espacial (tamaño del pixel que representa un área en el terreno) de 120 metros, en tanto que Landsat 7 una resolución de 60 m, ambas resoluciones hacen referencia solo a la banda térmica.

5.2.1.7.4. Índice de estrés hídrico (MSI)

De todos los índices no verdes de uso común, el más conocido es el denominado MSI, o Índice de Estrés Hídrico (Rock et al. 1985). Se calcula dividiendo la reflectancia de la banda 5 del Landsat por la de la banda 4. Como se mencionará anteriormente, la banda 4 responde a la biomasa presente y la banda 5, fuertemente afectada por el contenido de agua en la planta, tiene una respuesta similar en plantas sanas, pero en una planta seca o bajo stress hídrico, la reflectancia medida aumenta proporcionalmente más que la de la banda 4. El resultado es que a medida que la vegetación se seca, el MSI disminuye. Conforme una hoja se seca, aumenta su reflectancia a lo largo de todo el espectro. El secado produce aumentos en la zona del rojo (0,6 – 0,7 μ m), y en el infrarrojo medio en la zona de las bandas de absorción de agua (1,4 μ m, 1,9 μ m, y 2,6 μ m) (Towers, 2002). El MSI puede ser una alternativa para conocer el estado de estrés hídrico de un cultivo o una cobertura vegetal, y está relacionado con la temperatura de la planta y la humedad aprovechable del suelo (Palacios et al., 2009).

5.3. MARCO CONCEPTUAL

Imágenes Multiespectrales

Las imágenes multiespectrales son aquellas que reproducen la forma de un objeto dependiendo de la longitud de onda que este emitiendo dicho objeto, en otras palabras, es un conjunto de imágenes del mismo objeto representadas en diferentes longitudes de onda. Las cuales se conforman normalmente por una cantidad entre 3 a 20 bandas frecuenciales que no necesariamente deben estar adyacentes las unas de las otras y que permiten obtener un barrido discreto de las intensidades reflejadas por los objetos en las distintas longitudes de onda.

Imágenes Satelitales

Una imagen satelital o imagen de satélite se puede definir como la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen la información reflejada por la superficie de la Tierra que luego es enviada de regreso a ésta y que, procesada convenientemente, entrega valiosa información sobre las características de la zona representada.

Satélite Artificial

Vehículo espacial, tripulado o no, que se coloca en órbita alrededor de la Tierra o de otro astro, y que lleva aparatos apropiados para recoger información y transmitirla.

Sensores Remotos

Los sensores remotos son sistemas o instrumentos utilizados para adquirir información de un objeto, área o fenómeno sin tener contacto físico con ellos. Generalmente son empleados en aeronaves o satélites con los que se pueden adquirir información meteorológica, cartográfica, hidrológica, etc., y por tal razón son

de gran utilidad para el estudio del medio ambiente en general, geología, geografía, cartografía y entre muchas otras.

Temperatura superficial: se refiere al nivel de energía térmica que posee la superficie de un objeto o la atmosfera terrestre, se puede determinar de diferentes formas con distintas herramientas, unas con más exactitud que otras.

Variabilidad climática

Denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropógeno (variabilidad externa).

5.4. MARCO CONTEXTUAL

La zona minera del Cesar está ubicada en el centro del departamento, en la cuenca del río Cesar y tiene una extensión de 2.423,5 km² (ANLA, 2015) (**Figura 2**) La producción de minerales se concentra en los municipios de Becerril, Agustín Codazzi, La Jagua de Ibirico, Chiriguana y el Paso. La autoridad ambiental con jurisdicción en la zona es la Corporación Autónoma Regional de Cesar – CORPOCESAR. **Figura 2**

La Zona minera del Cesar pertenece a la ecorregión denominada valle del río Cesar; esta ecorregión es la más grande del departamento, en donde se desarrolla la mayor parte de su economía y se asienta la mayor parte de la población. (CORPOCESAR, 2012), esta Zona tiene un clima variable en cuanto a precipitación y altitud y presenta seis paisajes: montaña, lomerío, piedemonte, planicie, valle y una zona que corresponde a un complejo cenagoso. **Figura 3**

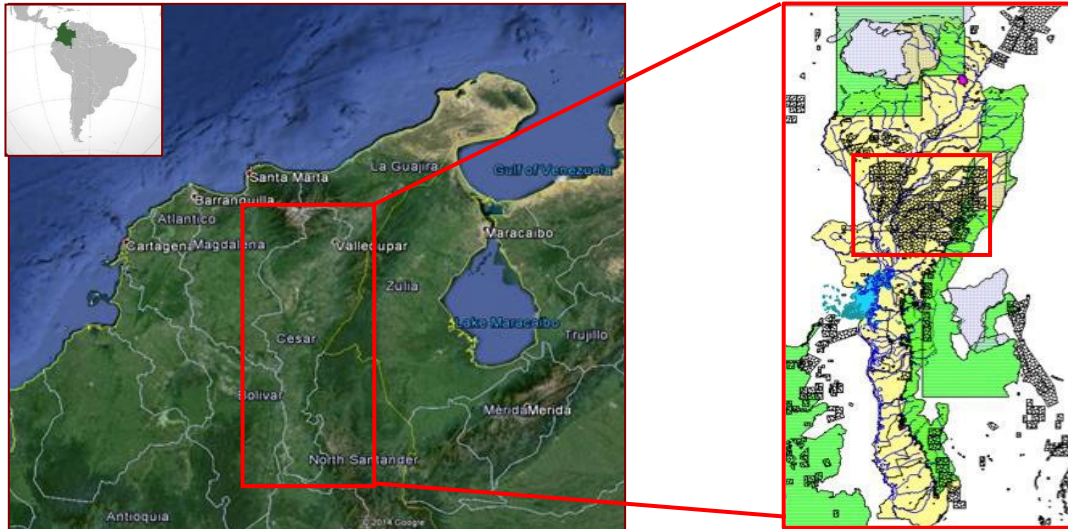


Figura 2. Google maps y Documento "contexto minero del cesar"

Fuente: Foro "Contexto minero del Cesar" 2011. P. 5

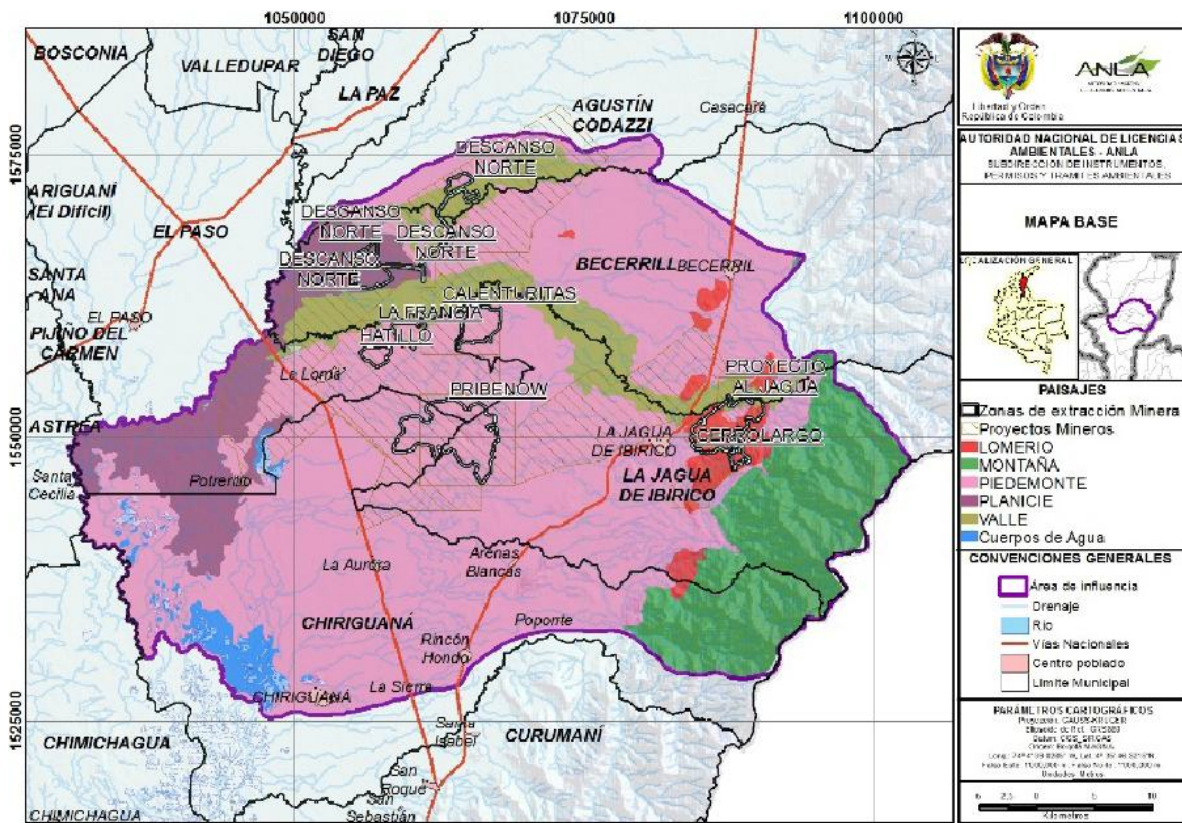


Figura 3. Localización del área de estudio en el departamento del Cesar.

Fuente: ANLA, 2015

5.5. MARCO LEGAL

A continuación, se hará una breve revisión de las principales normas, estrategias y planes que regulan la actividad minera y el manejo de los recursos naturales por los marcos legales vigentes.

Norma	Objeto
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio del Medio Ambiente, reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables; se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). En el título VIII se establece la obligatoriedad de la licencia ambiental y sus disposiciones.
Ley 141 de 1994	Por la cual se crean el Fondo Nacional de Regalías, la Comisión Nacional de Regalías, se regula el derecho del Estado a percibir regalías por la explotación de recursos naturales no renovables, se establecen las reglas para su liquidación y distribución y se dictan otras disposiciones.
Ley 685 de 2001- Código de Minas:	plantea como objetivos de interés público, fomentar la exploración técnica y la explotación de los recursos mineros de propiedad estatal y privada; estimular estas actividades para satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa y para que su aprovechamiento se realice en forma armónica

	con los principios y normas de explotación racional de los recursos naturales no renovables y del ambiente, bajo un concepto integral de desarrollo sostenible y del fortalecimiento académico y social del país.
Ley 685 de 2001	Condiciones del aporte social. El aporte o contribución de los particulares a una sociedad, del derecho a explorar y explotar emanado de un título minero, estará condicionado a la vigencia de ese derecho. PASAR A INV. SOCIAL
Ley 1382 de 2010	busca modificar el otorgamiento de concesiones mineras, la formalización de la minería artesanal, las zonas excluibles de minería, los requisitos de licencia ambiental para proyectos mineros, el régimen de prórrogas de los contratos de concesión minera y el trámite para la conformación de las áreas de la integración minera, entre otros
Ley 1658 de 2013	Busca proteger y salvaguardar la salud humana y preservar los recursos naturales renovables y el ambiente. Para ello, se establece la erradicación del uso de mercurio para la minería en todo el territorio nacional en un plazo máximo de 5 años desde la vigencia de la ley.
Ley 1753 de 2015	Se da continuidad a las áreas estratégicas mineras creadas en el artículo 108 de la Ley

	1450 de 2011, como mecanismo alternativo al régimen ordinario, para la asignación al derecho de explorar y explotar minerales, por medio de un proceso de selección objetiva. Denomina estas áreas como "áreas de reserva estratégica mineras".
Decreto 2358 de 1971	Comisión de Recursos Energéticos, se manifiesta la Regulación económica del sector energético
Decreto 636 de 1974	Se revisa la organización administrativa del Ministerio de Minas y Petróleos y cambia su nombre por el de Ministerio de Minas y Energía.
Decreto 1385/1995	Mecanismos de conciliación, Establece el mecanismo de conciliación para los eventos de superposiciones de áreas entre explotadores de hecho y títulos mineros otorgados
Resolución 40391 de 2016	por la cual se adopta la Política Minera Nacional, se constituye como el marco de operación y la línea estratégica para el desarrollo del sector en el país. En él se puede encontrar un análisis contextual con los principales retos del sector, así como el marco estratégico y los pilares que se deben tener en cuenta para que la actividad genere valor agregado al desarrollo de las regiones, por medio del diálogo tripartito y los instrumentos de buenas prácticas.

6. MARCO METODOLOGICO

Para el desarrollo del proyecto se plantea el siguiente procedimiento, inicialmente se realiza una investigación exhaustiva como estado del arte en la cual se recopilará información relacionada con la implementación de la técnica de percepción remota para la estimación de índices de variabilidad climática en proyectos, libros, artículos, material virtual, entre otros. Posteriormente se busca la forma de obtener las imágenes satelitales LANDSAT en plataformas virtuales, se delimita la zona minera del Departamento de Cesar entre los años 1989– 2017 y por el método de censado remoto, estas se estudiarán teniendo en cuenta las características de las imágenes satelitales para identificar las propiedades que permitan la estimación de estos índices por medio de correcciones geométricas y atmosféricas.

A continuación, se realizará un análisis de las imágenes satelitales para obtener los indicadores ambientales propuestos (NDVI, SAVI, MSI y TS) en la zona de estudio con ayuda de programas de análisis como PCI Geomatics y ARCGIS, implementando técnicas halladas en los manuales Landsat, posteriormente realizar un análisis del comportamiento de estos indicadores de variabilidad climática en la zona minera del departamento del cesar.

Se desarrollará un análisis de correlación entre la temperatura superficial y el índice de vegetación NDVI para determinar la posible relación entre estos dos indicadores, estos resultados se analizarán para cada año. También se determinarán las zonas con los valores más críticos para cada indicador después de obtener las imágenes analizadas. La **Figura 4** muestra el diagrama de flujo de la metodología utilizada.

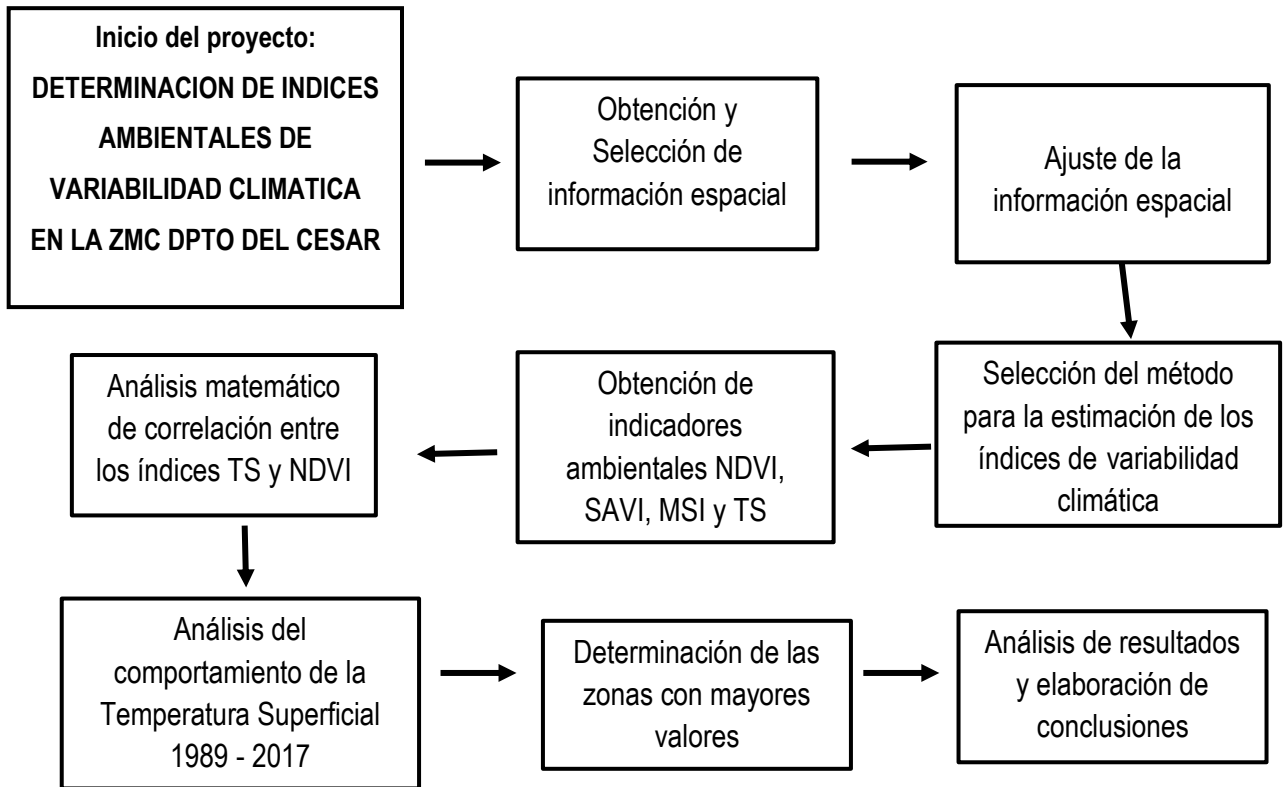


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología del proyecto.

Fuente: Elaboración Propia

6.1. TIPO DE INVESTIGACION

La investigación efectuada en este proyecto es de tipo correlacional, siendo esta descriptiva, la cual tiene como finalidad determinar el grado de relación o asociación no causal existente entre dos o más variables, se caracteriza porque inicialmente se miden las variables y luego, mediante hipótesis correlacionales y la aplicación de técnicas estadísticas, se estima la correlación, este tipo de investigación puede aportar indicios sobre las posibles causas de un fenómeno. (Fidias G. Arias – 2012)

La investigación desarrollada en este proyecto pretende establecer una relación entre los efectos contaminantes de la actividad minera en el Departamento del Cesar con los diferentes índices de variabilidad climática, queriendo responder a la

pregunta, “¿Cuál es la magnitud del impacto ocasionado en la zona de influencia por la actividad minera y como se ve reflejado este en la calidad de la vegetación y temperatura superficial, mediante el análisis de índices de variabilidad climática?”

6.2. NIVEL DE INVESTIGACION

El presente estudio soporta diferentes niveles de investigación, como son el nivel correlacional, el cual mide el grado de relación significativa existente entre los índices de variabilidad climática que son las variables, o el conocimiento del comportamiento de la variable temperatura superficial (TS) respecto a la calidad de vegetación (NDVI) y el nivel explicativo que pretende dar a conocer las diferentes características de las variables que miden el detrimento de los recursos naturales en la zona minera del departamento del cesar.

6.3. POBLACION DE ESTUDIO

La población objeto de estudio es la Zona minera del departamento del cesar, abarcando principalmente la calidad del recurso forestal, el recurso suelo y la temperatura superficial en el departamento.

6.4. MUESTRA POBLACIONAL

La muestra escogida para el desarrollo de las actividades se centra en la calidad de la vegetación, el recurso suelo y la temperatura superficial en a la zona minera del Departamento del cesar, precisamente aledaña a los municipios de La Jagua de Ibirico, Becerril, Chiriguaná, Agustín Codazzi y El Paso, por ser la zona donde se perjudica principalmente por los impactos relacionados con la actividad minera.

6.6. DESARROLLO METODOLOGICO

La metodología de este trabajo se describe a continuación en diferentes etapas:

6.6.1. ETAPA 1: Estimar los valores de los indicadores NDVI, SAVI y MSI requeridos en el área de estudio entre los años 1989 y 2017 para estimar el estado de la cobertura vegetal en el área de estudio

Actividad 1.1: Selección de información espacial

Descripción: Esta etapa se basó en la obtención de las imágenes satelitales Landsat del Departamento del Cesar entre los años 1989 y 2017, este rango fue elegido teniendo en cuenta, que para realizar la comparación del antes y el después de los recursos naturales en la zona minera del departamento del cesar durante la actividad minera era necesario hallar los índices de variabilidad climática antes de que se iniciara la explotación de carbón, se logró encontrar las imágenes adecuadas del año 1989. La información con la cual se trabajó, estas imágenes se obtuvieron en la base de dato del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Para su selección se consideró la fecha de adquisición y el porcentaje de nubosidad. Los criterios de selección utilizados para el proyecto pueden apreciarse en la **Tabla 3**, en esta tabla las palabras path y row hacen referencia a una ubicación geográfica del satélite sobre la tierra. Las imágenes descargadas se resumen en la **Tabla 4**.

Path	8
Row	53
Sensor	Landsat 5 TM Landsat 8 OLI_TIRS
Año inicial	1989

Año final	2017
% de nubes	<15%

Tabla 3. Criterios de selección de las imágenes satelitales

Fuente: Elaboración Propia

Sensor	Año	Fecha adquisición
Landsat 5	1989	30 de diciembre
Landsat 7	2014	19 de diciembre
Landsat 7	2015	22 de diciembre
Landsat 7	2016	24 de diciembre
Landsat 7	2017	27 de diciembre

Tabla 4. Imágenes satelitales Identificadas para el área de estudio

Fuente: Elaboración Propia

Actividad 1.2: Ajuste de información digital

Descripción: Es esta etapa se preparó la información delimitando el área de estudio para las diferentes imágenes escogidas, se realizó la corrección radiométrica y geométrica de los datos para poder comparar la información en la misma zona y con el mismo sistema. El ajuste de la información consiste en transformar el sistema de referencia de las imágenes satelitales al sistema oficial de Colombia y específicamente del Departamento del Cesar. El sistema de referencia es un conjunto de convenciones que le permiten a un observador hacer medidas desde determinado lugar de la tierra. Estas pueden ser de carácter geográfico (medidas en grados) o proyectadas (medidas en metros) sobre un tipo de superficie. Estas correcciones se realizaron con el software PCI Geomatics. Figura

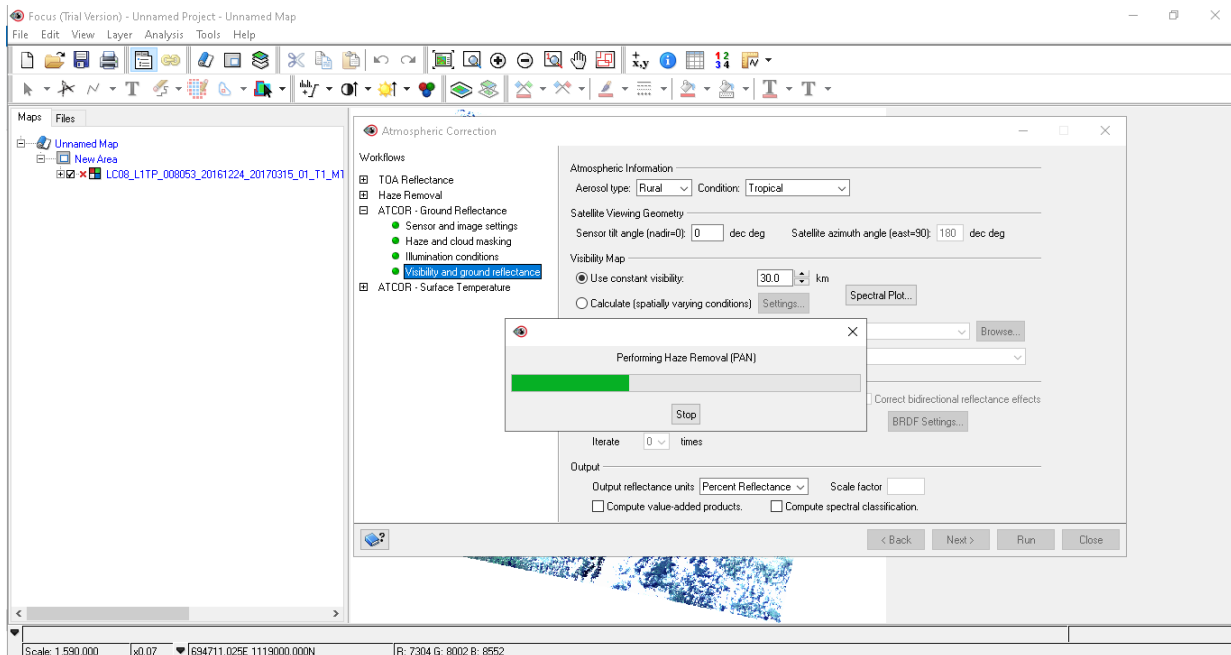


Figura 5. Corrección atmosférica realizada a las imágenes en el programa PCI Geomatic.

Actividad 1.3: Selección del método para el cálculo de los índices de variabilidad climática

Descripción: Investigación en páginas web, artículos, libros y otras fuentes para determinar la metodología para calcular los índices de variabilidad climática (NDVI, SAVI, MSI y TS), mediante el uso de la tecnología de sensores remotos y el análisis multiespectral, Esta búsqueda condujo al manual de usuario de Landsat 7 (NASA, 2007), en el cual se proponen las ecuaciones para transformar los números digitales se utiliza el software PCI Geomatic y ArcGis, para realizar en análisis de los diferentes índices.

Actividad 1.4: Estimación de Indicadores ambientales NDVI, MSI, SAVI

Descripción: Después de obtenidas las ecuaciones de los índices ambientales en el manual de usuario de Landsat 7 (NASA.2007) se procedió a aplicarlas utilizando

INGENIERÍA
AMBIENTAL Y SANITARIA

el programa PCI Geomatics a las imágenes anteriormente seleccionadas y procesadas utilizando las siguientes formulas y procedimientos:

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Este índice es derivado de la combinación de las reflectancias captadas en el rango espectral del rojo e infrarrojo cercano. Estas reflexiones espectrales son en sí cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral individual; por tanto, estos toman valores entre un rango de 0,0 a 1,0. El NDVI varia como consecuencia entre -1,0 y +1,0. Para el caso de la imagen Landsat 8 corresponden a las bandas 4 y 5 respectivamente, Este Índice se calcula a partir de la siguiente formula:

$$NDVI = \frac{NIR (Banda 4) - R(Banda 5)}{NIR(Banda 4) + R(Banda 5)} \quad (1)$$

Donde: NIR= reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano (banda 4).

R = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo (banda 5).

Índice de estrés hídrico (MSI).

El MSI combina las reflectancias captadas en el infrarrojo cercano e infrarrojo medio. En la imagen Landsat 8 corresponden a las bandas B5 y B6 respectivamente. Se calcula dividiendo la reflectancia de la banda 6 del Landsat por la de la banda 5, la banda 5 responde a la biomasa presente y la banda 6, fuertemente afectada por el contenido de agua en la planta, tiene una respuesta similar en plantas sana, pero

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

en una planta seca o bajo estrés hídrico, la reflectancia medida aumenta proporcionalmente más que la de la banda 4. El resultado es que a medida que la vegetación se seca, el MSI aumenta. La fórmula utilizada es:

$$MSI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (2)$$

Donde: NIR= reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

SWIR = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo medio

Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

El SAVI combina las reflectancias captadas en el infrarrojo cercano y rojo, los mismos del NDVI, y utiliza un factor de corrección del efecto suelo llamado “línea de suelo”, el valor de este parámetro L es 0.5 Este índice trata de corregir el efecto del suelo en el valor del índice. Es propio para zonas áridas. se puede definir a partir de dos puntos, correspondientes a los valores de reflectividad de un mismo suelo húmedo y seco en las bandas R e IRC. Si en un punto concreto no hay vegetación, ese punto se representará sobre la línea del suelo. Pero si hay una cierta cantidad de vegetación, la reflectividad de esa zona en el rojo será más baja que la del suelo desnudo, y en el infrarrojo será más alta, por lo que el punto quedará representado alejado de la línea del suelo. Cuanto más lejos esté de la línea del suelo, más vegetación habrá en el pixel; por eso, se toma como una medida de la cantidad de vegetación, El SAVI se calculó mediante la siguiente expresión:

$$SAVI = \frac{IR - R}{IR + R + L} (1 + L) \quad (3)$$

Donde: **IR** = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

R = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo

L = es un parámetro que varía según la densidad de la vegetación, en las 2 imágenes se utilizó 0,5.

6.6.2. ETAPA 2: Calcular el índice de temperatura superficial en cada uno de los momentos del periodo de estudio para establecer el comportamiento de la temperatura.

Actividad 2.1: Estimación del indicador de Temperatura superficial (TS) en el periodo 1989 - 2017

Descripción: Con la obtención de las fórmulas para el cálculo de la temperatura superficial (TS) del manual de usuario de Landsat 7 y Landsat 5 para las imágenes correspondientes al satélite Landsat 8 y Landsat 5 respectivamente se procedió a aplicarlas utilizando el programa ArcGis a las imágenes anteriormente seleccionadas y procesadas utilizando las siguientes formulas y procedimientos:

ÍNDICE DE TEMPERATURA SUPERFICIAL (TS) PARA IMÁGENES LANDSAT 8

El algoritmo requerido para hallar la Temperatura superficial de la tierra fue creado por ERDAS IMAGINE 2014, y solo puede ser utilizado para procesar imágenes LANDSAT 8 debido a la complejidad de datos. Para obtener la temperatura de la superficie, la radiancia espectral a nivel de sensor debe ser transformada a temperatura de brillo del satélite, usando las bandas térmicas de Landsat 8.

(Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data, 2016) En este caso se usa la banda 10. Inicialmente se requiere el uso de varias ecuaciones en la calculadora de imágenes ráster de PCI Geomatics, siguiendo los siguientes pasos:

PASO 1: Calculo de TOA (Top of Atmospheric) radiancia espectral.

$$TOA(L\lambda) = ML * Qcal + AL \quad (4)$$

Donde:

ML=Factor de reescalamiento multiplicativo específico de banda (valor disponible en el archivo de metadatos MTL. En la línea RADIANCE_MULT_BAND_10)

Qcal=Corresponde a la banda 10

AL= Factor de reescalamiento aditivo específico de la banda (valor disponible en el archivo de metadatos MTL. En la línea RADIANCE_ADD_BAND_10)

PASO 2: Conversión del TOA (Top of Atmospheric) a Temperatura de brillo.

Después de que los números digitales (DNs) sean convertidos a reflectancia, la banda 10 correspondiente al infrarrojo térmico debe ser convertido de radiancia espectral a temperatura de brillo (BT) usando las constantes térmicas disponibles en el archivo de metadatos. Para transformar la radiación en temperatura superficial en grados Kelvin, se utiliza la siguiente ecuación:

$$BT = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} - 273.15 \quad (5)$$

INGENIERÍA
AMBIENTAL Y SANITARIA

Donde:

BT = Temperatura de brillo en grados Celsius

TOA (Lλ) = Radiación espectral (Watts/(m²*sr*um))

K1 y K2= Constantes de conversión térmica específica de la banda extraídas del archivo metadatos.

se debe transformar la temperatura de grados Kelvin a grados Celsius, por ser la unidad más común para el Público de la zona de interés, para esto se les resta en la ecuación 273.15.

PASO 3: Calculo del NDVI

Para el cálculo del Índice de vegetación diferencial normalizado se utilizan las bandas rojas visible y el infrarrojo cercano, la importancia de estimar el NDVI es esencial ya que la cantidad de vegetación presente es un factor importante y en NDVI se puede utilizar para inferir la condición general de la vegetación, es necesario calcular este índice ya que luego se debe hallar la proporción de Vegetación (Pv) y la Emisividad (E), la ecuación es la siguiente:

$$NDVI = \frac{NIR(Banda5) - R(Banda 4)}{NIR(Banda 5) + R(Banda 4)} \quad (6)$$

Donde el NIR representa el infrarrojo cercano (banda 5) y el R el rojo (banda 4)

PASO 4: Calculo de la proporción de la vegetación (Pv)

Para esta ecuación se requiere del valor máximo y mínimo de NDVI arrojado en la ecuación anterior, de la siguiente manera:

$$Pv = \sqrt{(NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})} \quad (7)$$

**INGENIERÍA
AMBIENTAL Y SANITARIA**

Donde NDVI es el índice de vegetación diferencial normalizado, NDVI_{min} y NDVI_{max} es el valor mínimo y máximo respectivamente del índice de vegetación diferencial normalizado.

PASO 5: Calculo de la Emisividad de la superficie (E)

La Emisividad debe conocerse para estimar la temperatura superficial de la tierra, ya que la temperatura de brillo (BT) está referida como la de un cuerpo negro, esta predice la radiación emitida, y es la eficiencia de transmitir energía térmica a través de la superficie hacia la atmosfera. Se calcula de la siguiente manera:

$$E = 0.004 * Pv + 0.986 \quad (8)$$

PASO 6: Calculo de la temperatura de la superficie de la Tierra (LST)

$$LST = \left(\frac{BT}{\left(\frac{1 + 0.00115 * BT}{1.4388} \right) * Ln(E)} \right) \quad (9)$$

Donde:

BT: Temperatura de brillo en grados Celsius

E: Emisividad

CALCULO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL PARA LANDSAT 5

Según el manual de usuario de Landsat 7 (NASA, 2007), en el cual se proponen las ecuaciones para transformar los números digitales en temperatura superficial en grados Kelvin. Se consultaron los coeficientes de calibración radiométrica recomendados para Landsat 5, las ecuaciones se presentan a continuación:

PASO 1: Transformación de los números digitales a irradiación. Esta ecuación transforma los números digitales de las imágenes que están a 8 bits y que van de 0 a 255 a unidades de radiación (radiancia) cuyas unidades de medida son: (watts/(m²*ster*μm) (NASA, 2007).

$$L\lambda = \left(\frac{LMAX\lambda - LMIN\lambda}{QCALMAX - QCALMIN} \right) * (QCAL - QCALMIN) - LMIN\lambda \quad (10)$$

Donde:

Lλ= Irradiación espectral en la apertura del sensor en watts/(m²*ster*μm)

QCAL= Valor del pixel cuantificado en ND (número digital)

LMINλ= Irradiación espectral correspondiente al QCALMIN en watts/(m²*ster*μm)

LMAXλ= Irradiación espectral correspondiente al QCALMAX en watts/(m²*ster*μm)

QCALMIN= el valor mínimo de pixel cuantificado (correspondiente a LMIN) en DN
es igual a 0 para productos procesados antes de 4/5/2004

QCALMAX= número mayor de pixel cuantificado (correspondiente a LMAX) en DN
es igual a 255

PASO 2: esta ecuación permite transformar la irradiación en temperatura superficial en grados Kelvin (NASA, 2007)

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} \quad (11)$$

Donde:

T: Temperatura en grados Kelvin efectiva en satélite

K1: Constante de calibración 1

K2: Constante de calibración 2

$L\lambda$: Irradiación espectral en la apertura del sensor en $\text{watts}/(\text{m}^2 \cdot \text{ster} \cdot \mu\text{m})$

Tabla. Constantes de calibración de la banda térmica para el Landsat 5 y 8 (NASA)

El valor de temperatura obtenido de esta ecuación es en grados Kelvin por lo tanto se debe transformar este valor a grados Celsius por ser la unidad más común para el público, a los valores obtenidos se les resta 273.15, obteniendo el resultado final. La **Tabla 5** y la tabla 4 muestran las constantes de calibración y demás parámetros utilizados.

Sensor	Constante 1- K1	Constante 2 -K2
Landsat 5	607,76	1260,56

Tabla 5. Constantes de calibración de la banda térmica para el Landsat 5

Fuente: NASA, 2007

Banda	Rango espectral	$L_{MIN\lambda}$	$L_{MAX\lambda}$
	μm	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ster} \cdot \text{m})$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ster} \cdot \text{m})$
1	0,452-0,518	-152	169
2	0,528-0,609	-2,84	333
3	0,626-0,693	-1,17	264
4	0,776-0,904	-1,51	221
5	1,567-1,784	-0,37	30,2
6	10,45-12,42	1,2378	15,3032
7	2,097-2,394	-0,15	16,5
Sensor TM ($Q_{calmin}=1$ y $Q_{calmax}=255$)			

Tabla 6. Parámetros Landsat 5

Fuente: Chander, 2008

Actividad 2.2: Análisis del comportamiento de la Temperatura Superficial (TS) con los datos obtenidos.

Descripción: En base a los datos arrojados del análisis realizado a las diferentes imágenes seleccionadas de la Zona minera del Cesar en el programa ArcGis, se realizó un análisis gráfico objetivo, en donde se determinó el comportamiento de la temperatura superficial a través de los años 1989 hasta el 2017 teniendo en cuenta los fenómenos climatológicos predominantes en esta zona minera del Departamento del Cesar.

6.6.3. ETAPA 3: Analizar el comportamiento de la temperatura superficial en relación al estado de la vegetación mediante una correlación matemática.

Actividad 3.1: Realizar una correlación matemática entre los índices TS y NDVI

Descripción: Utilizando el método estadístico de correlación matemática se realizó la operación entre el índice de Temperatura superficial (TS) y el Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) para poder establecer una relación entre la calidad de la vegetación y el aumento de la temperatura superficial, comparando el estado de la vegetación y la temperatura calculada en las diferentes épocas de la zona de estudio.

Análisis de Correlación Cruzada. Mediante este tipo de análisis se logra obtener información acerca de la estructura espacial y temporal de las variables. Se aplica esta técnica a cada uno de los grupos de variables por separado (explicativas y explicadas), pudiéndose medir la intensidad de la asociación que existe entre ellas. A través de esta misma técnica, se asocia cada una de las variables explicadas con la totalidad de las variables explicativas.

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

La correlación matemática entre los valores del indicador NDVI y la temperatura superficial (TS) se realizó utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Cov_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N (Z_{ik} - \mu_i) (Z_{ik} - \mu_j)}{N - 1} \quad (12)$$

Donde:

Z= Valor de la celda

i,j= Las capas

μ = El promedio de la capa

k= Numero de la celda el particular

$$Corr_{ij} = \frac{Cov_{ij}}{\delta_i \delta_j} \quad (13)$$

Donde:

Covij= Covarianza entre las dos capas

δ_i = Desviación estandar de la capa i

δ_j = Desviación estándar de la capa j

Estas ecuaciones implican que la correlación varía entre +1 y -1, donde +1 significa una correlación positiva lo cual indica una relación directa entre las bandas, tal como cuando los valores de celda de una capa aumentan, es probable que los valores de celda de otra capa aumenten (directamente proporcional). Una correlación negativa significa que una variable cambia de manera inversa a la otra (indirectamente proporcional). Una correlación de cero significa que las bandas son independientes

entre sí. Los valores de correlación obtenidos para los diferentes años se encuentran en la **Tabla 7**.

6.6.4. ETAPA 4: Determinar los sectores con mayores valores en las variables de cambio climático estimadas en del Departamento del Cesar.

Actividad 4.1: Establecer los mayores o valores críticos en los municipios de la Zona mineral del Departamento del Cesar.

Descripción: Se desarrollará cada uno de los índices de calidad ambiental estimado anteriormente en los municipios que conforman la zona minera del departamento del Cesar entre ellos Becerril, Agustín Codazzi, La Jagua de Ibirico, Chiriguana y el Paso de esta manera delimitar las zonas que están sufriendo los mayores impactos ambientales en tema de calidad forestal, suelo y mayores cambios de temperatura.

En esta etapa se desarrollan las conclusiones en base al análisis de los resultados de la obtención de los índices de variabilidad climática, buscando establecer la relación existente entre cada uno de los índices y la afectación encontrada en la zona de estudio a través del tiempo. Teniendo en cuenta el grado de destrucción de los recursos forestales y el aumento de la temperatura superficial desde los años 1989 hasta el año 2017.

7. RESULTADOS Y ANALISIS

7.1 ESTIMACION DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL

La temperatura superficial de las imágenes Landsat escogidas fue realizado en el programa ArcGIS 10.5 utilizando la calculadora ráster y siguiendo el procedimiento de la etapa 2 en la página 51 que se demuestra en la **Figura 6**, **Figura 7**, **Figura 8**, **Figura 9**, **Figura 10** y **Figura 11** a continuación:

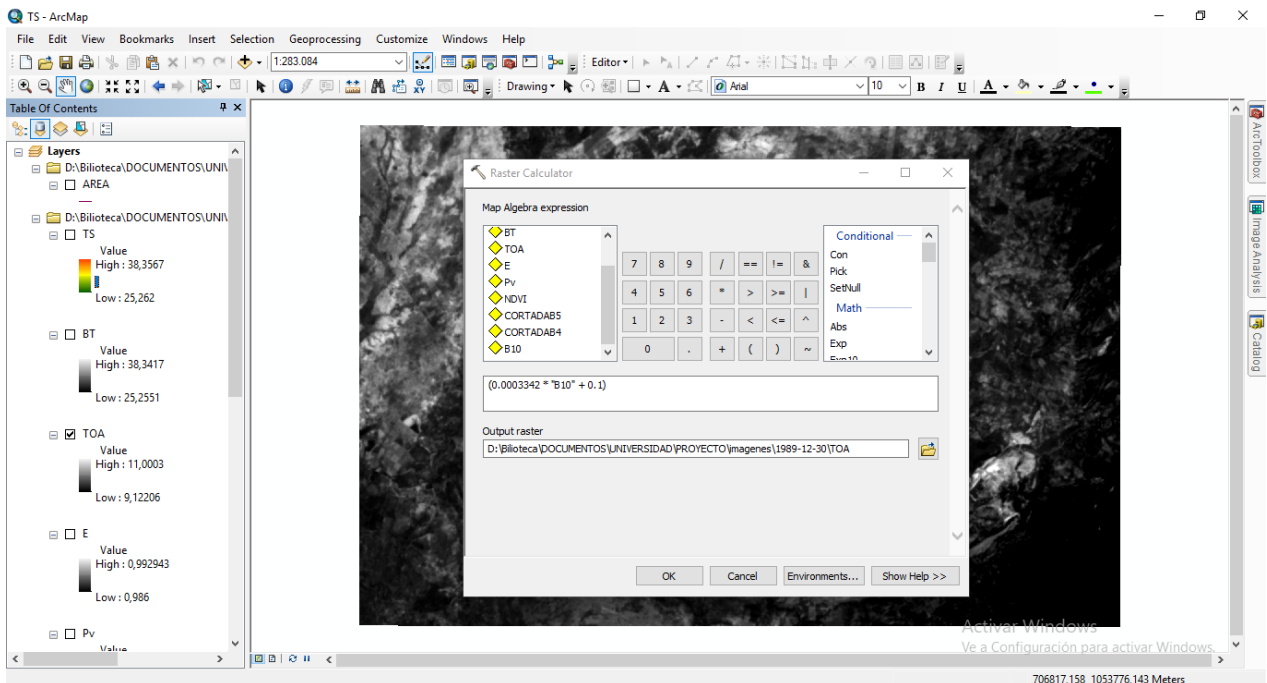


Figura 6. Calculo TOA (Top of Atmospheric).

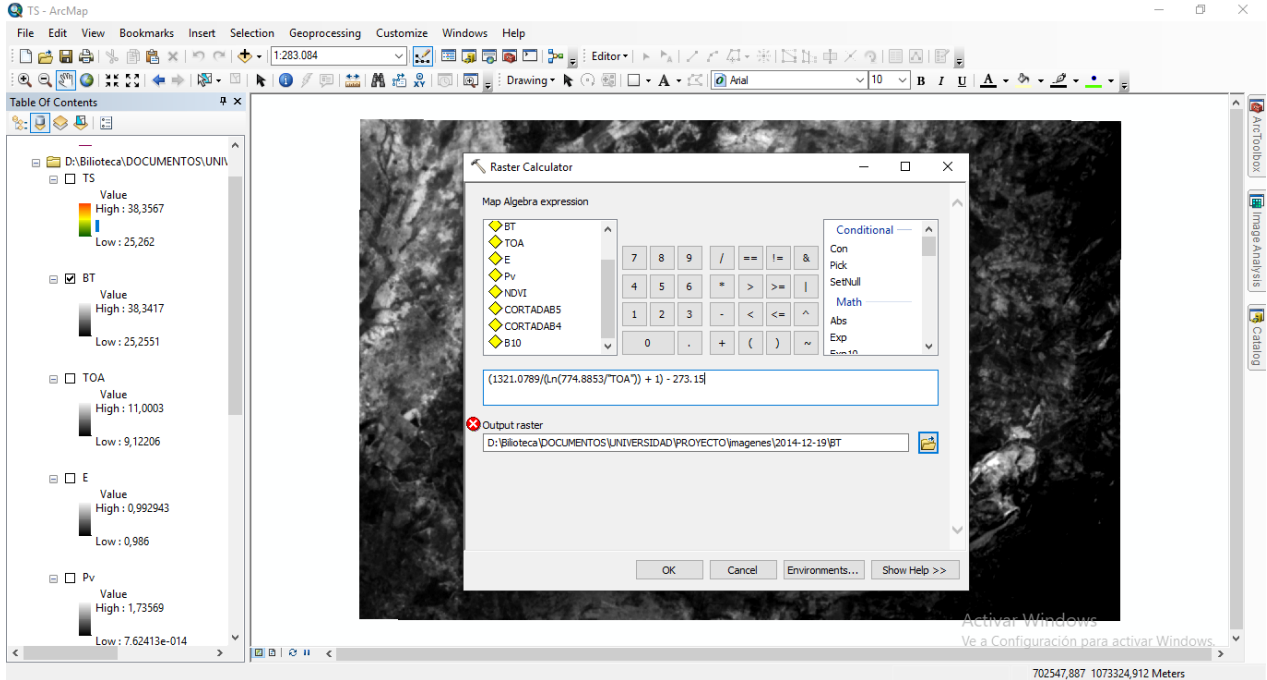


Figura 7. Cálculo de Temperatura de Brillo (BT).

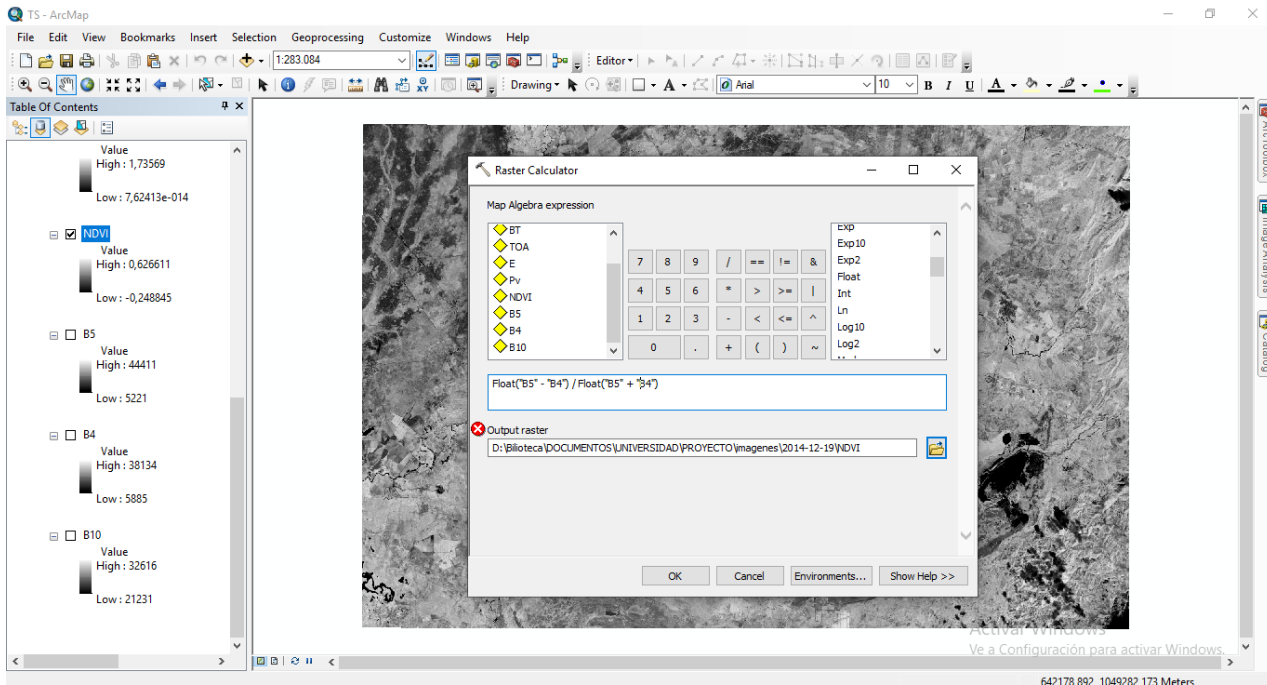


Figura 8. Cálculo del NDVI.

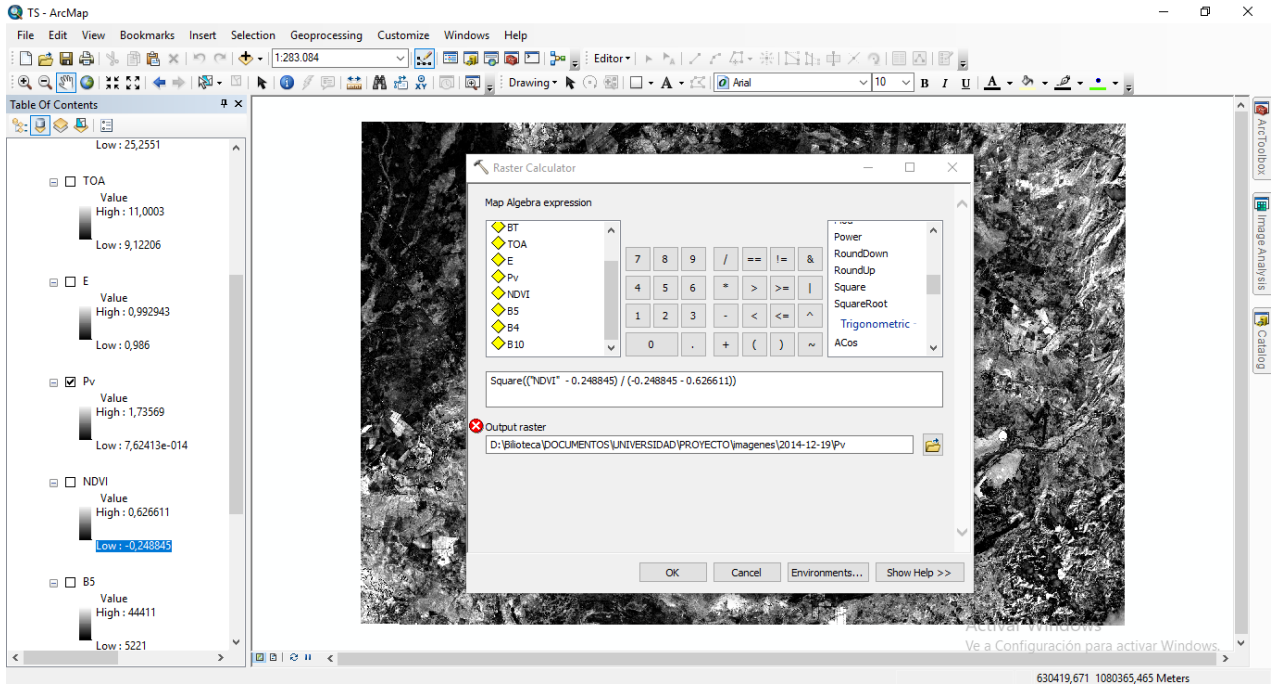


Figura 9. Cálculo de la Proporción de vegetación (Pv).

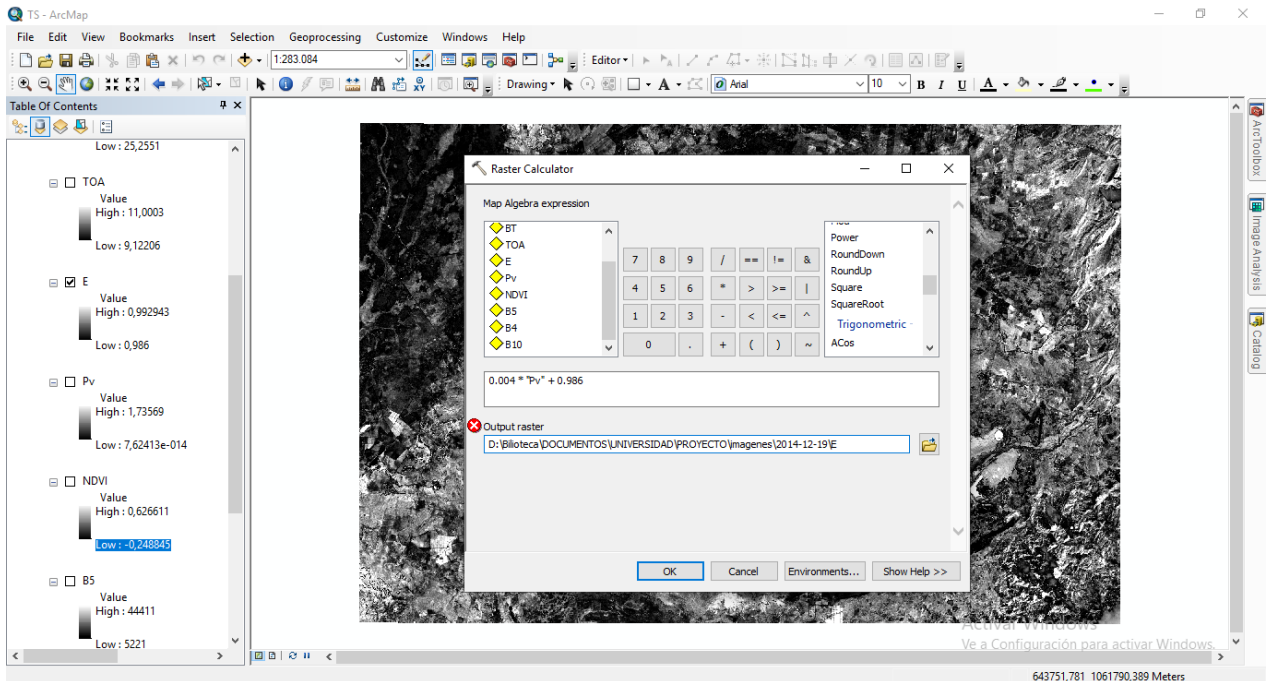


Figura 10. Cálculo de la Emisividad de la Superficie (E).

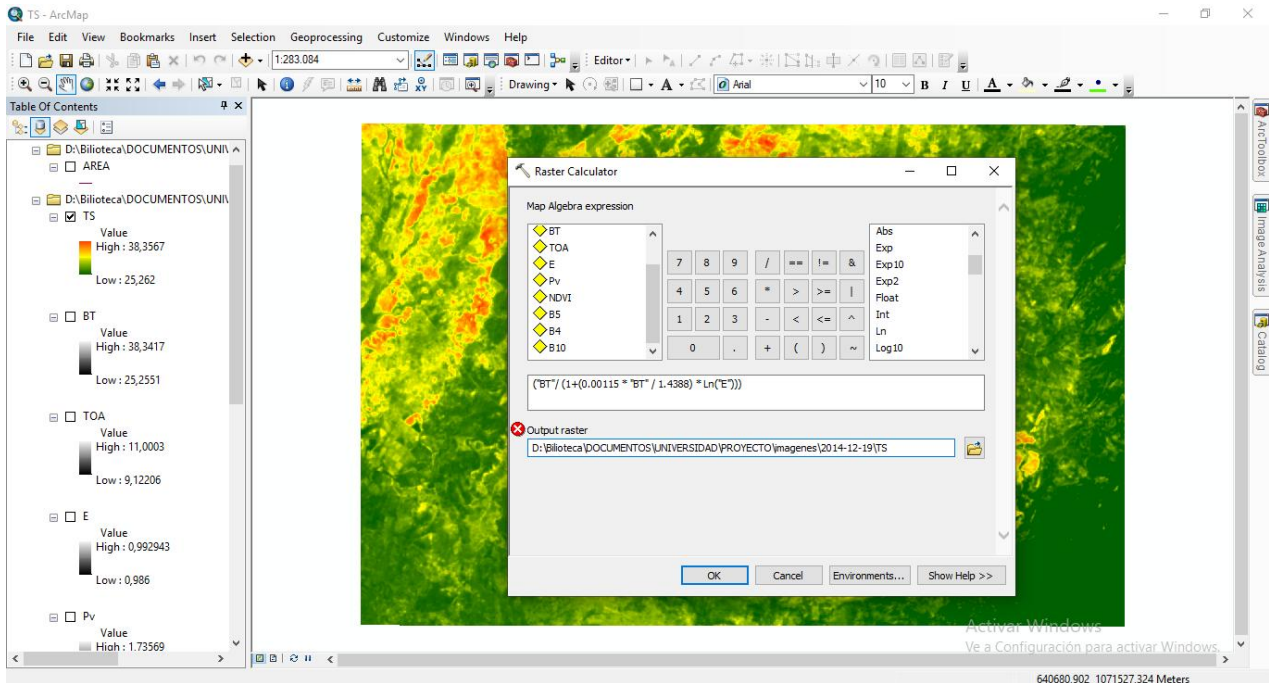


Figura 11. Cálculo de la Temperatura Superficial terrestre (TS) en el programa ArcGis.

Una vez calculada la temperatura superficial en grados Celsius se puede modificar la simbología de la capa para facilitar la observación y diferenciar la temperatura. En este caso se estableció una escala que fuera de verde a rojo. El verde representa los lugares más fríos y el rojo los más cálidos (**Figura 12**). Este mapa muestra, a simple vista, la aparición del fenómeno de isla de calor.

Este procedimiento se repitió para las demás imágenes satelitales.

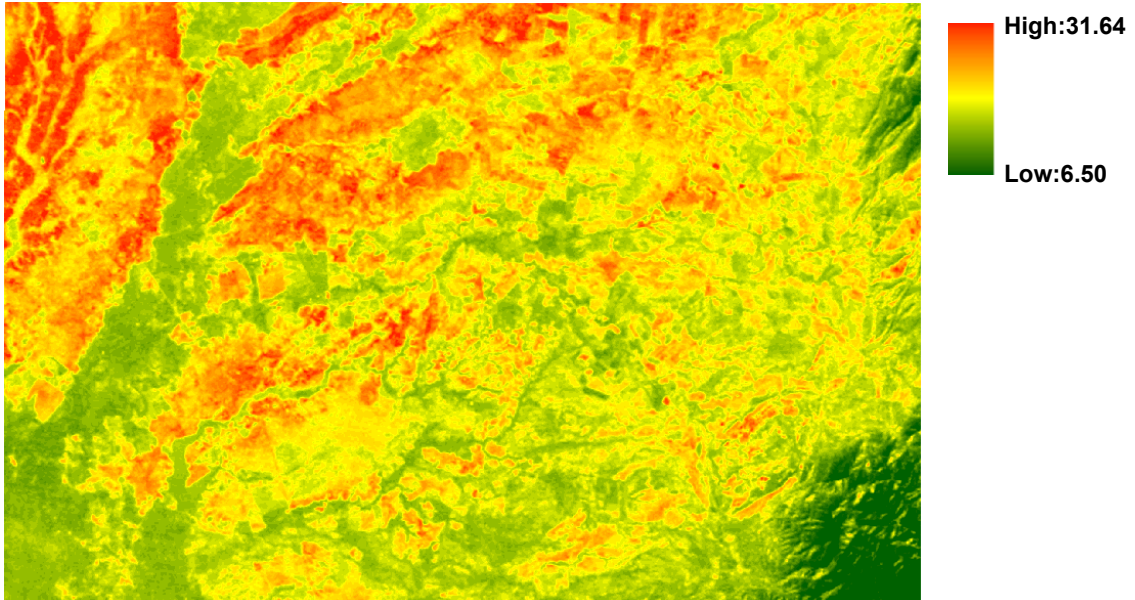


Figura 12. Temperatura Superficial para la Zona minera del Cesar en °C 30/12/1989

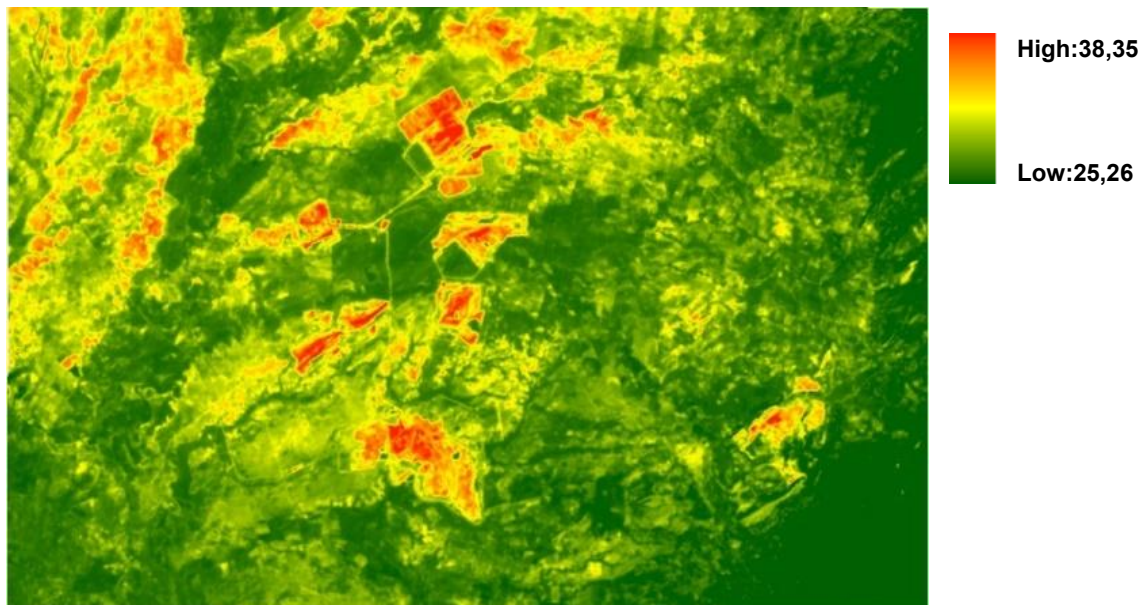


Figura 13. Temperatura Superficial para la Zona minera del Cesar en °C 19/12/2014

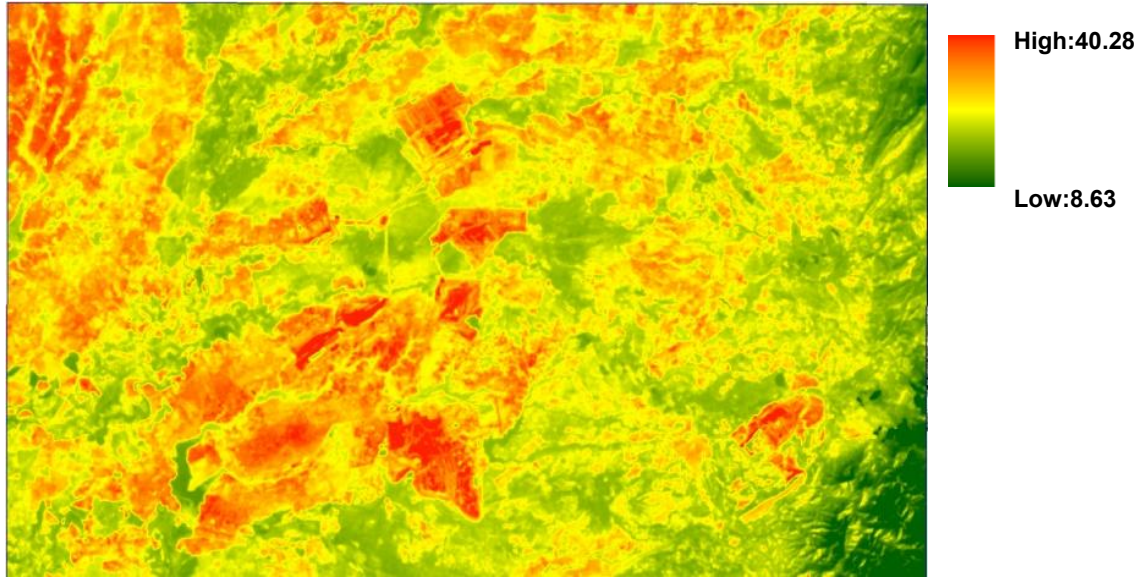


Figura 14. Temperatura Superficial para la Zona minera del Cesar en °C 22/12/20

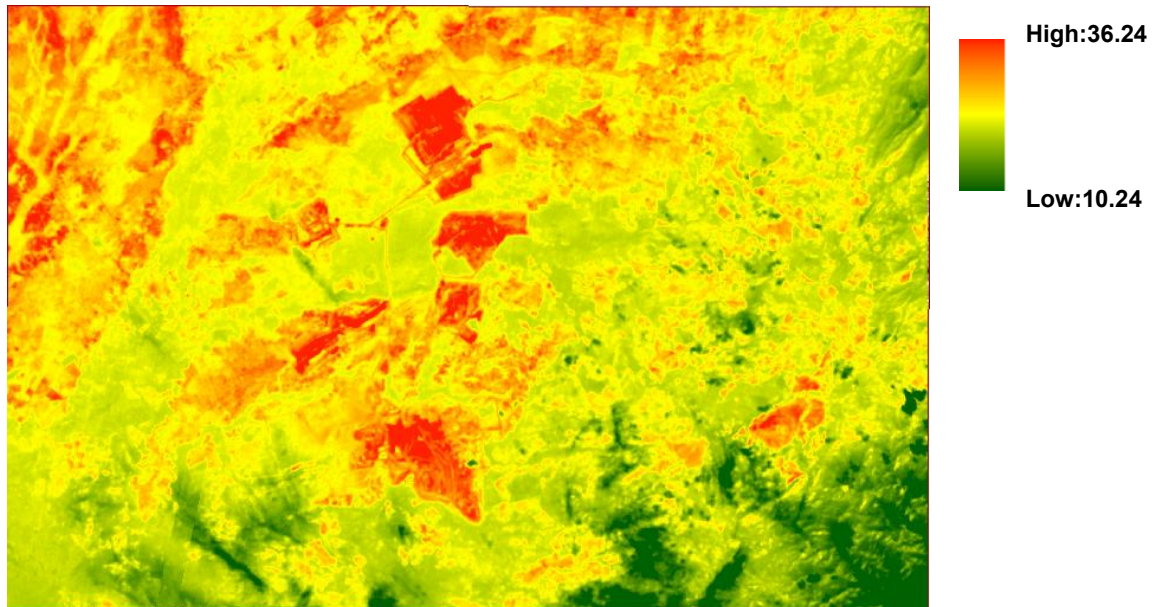


Figura 15. Temperatura Superficial para la Zona minera del Cesar en °C 24/12/2016

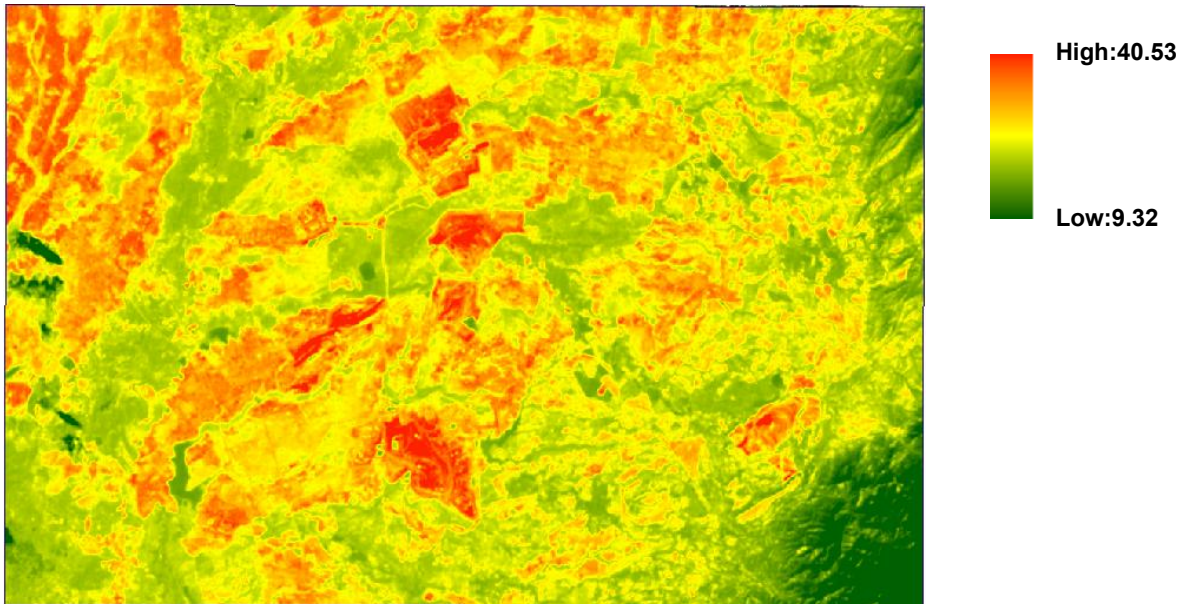


Figura 16. Temperatura Superficial para la Zona minera del Cesar en °C 27/12/2017

7.2. CALCULO DEL INDICE DE INTENSIDAD DE VEGETACION

El cálculo del NDVI se realizó en el programa PCI Geomatics, utilizando la ecuación (1), a continuación, en la **Figura 17** se muestra la aplicación de la ecuación en la calculadora ráster.

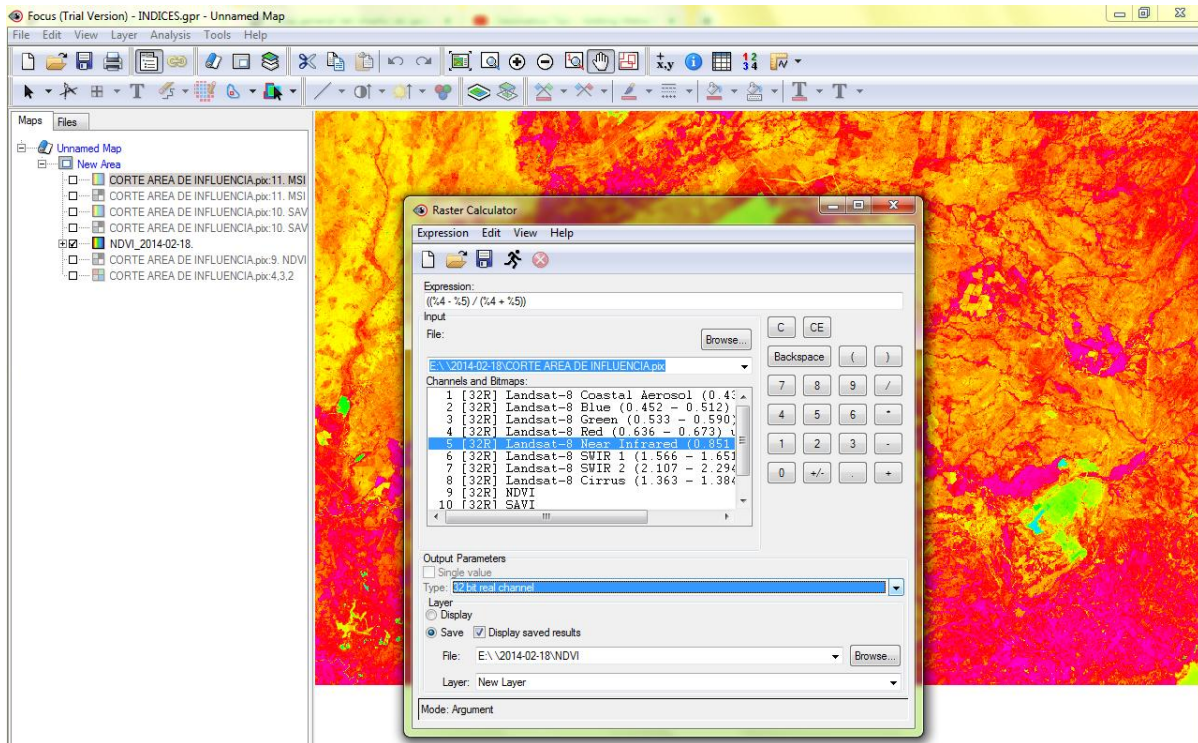


Figura 17. Cálculo del Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) en el programa Pci Geomatic.

Los valores negativos son zonas húmedas y el agua es representada por color azul, los suelos descubiertos y la vegetación rara serán representada por valores muy elevados y serán de color amarillo, la vegetación densa, húmeda y bien desarrollada serán de color fucsia y representan los mayores valores de NDVI.

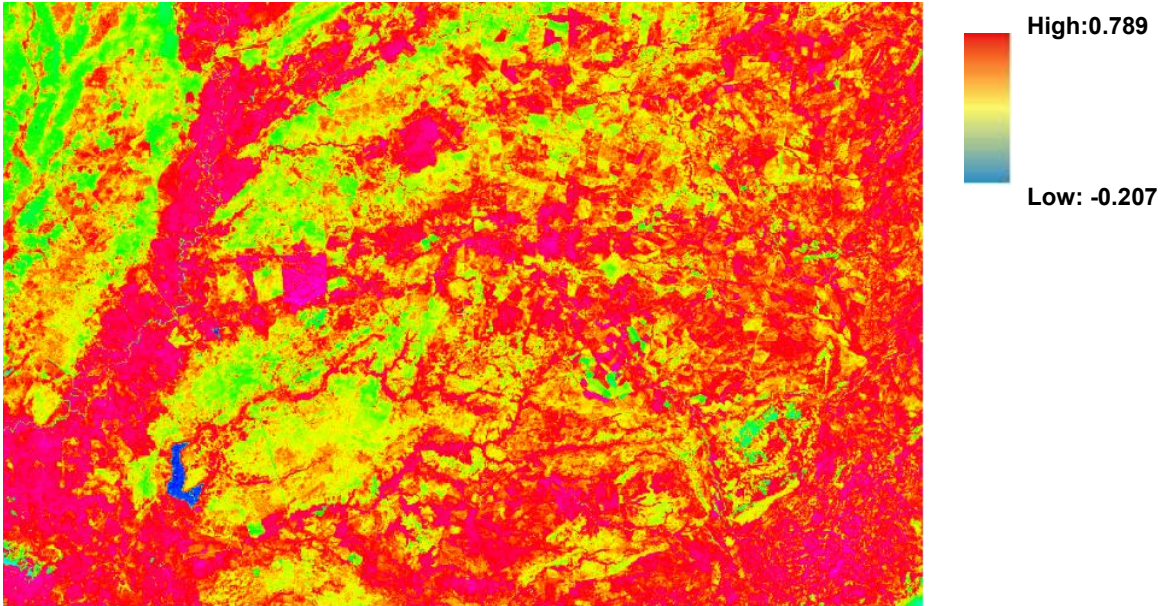


Figura 18. NDVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 30/12/1989

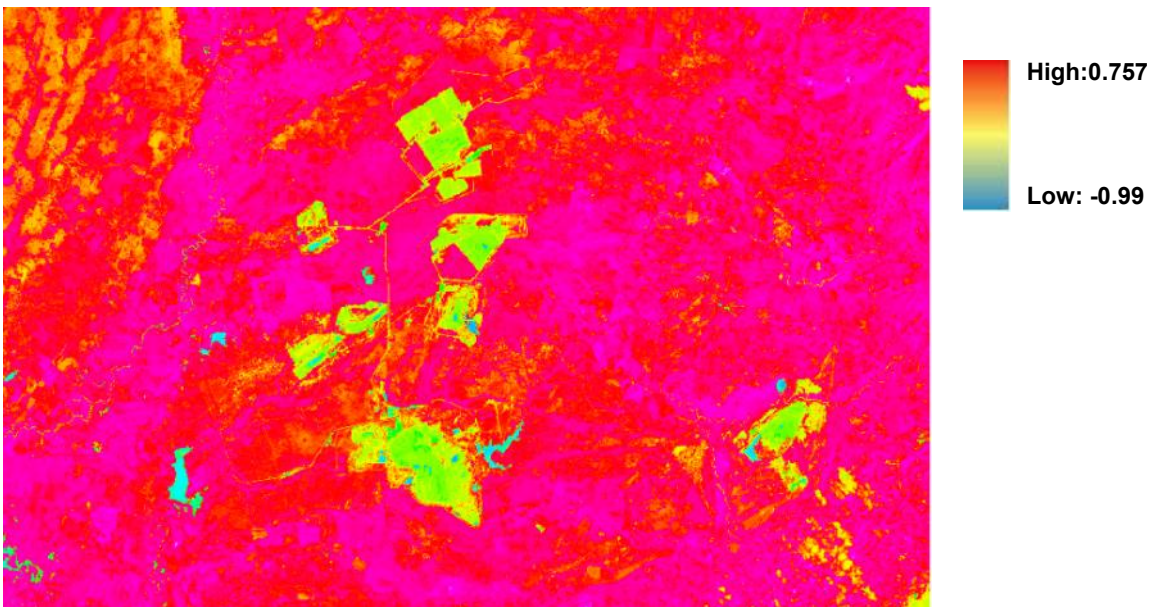


Figura 19. NDVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 19/12/2014

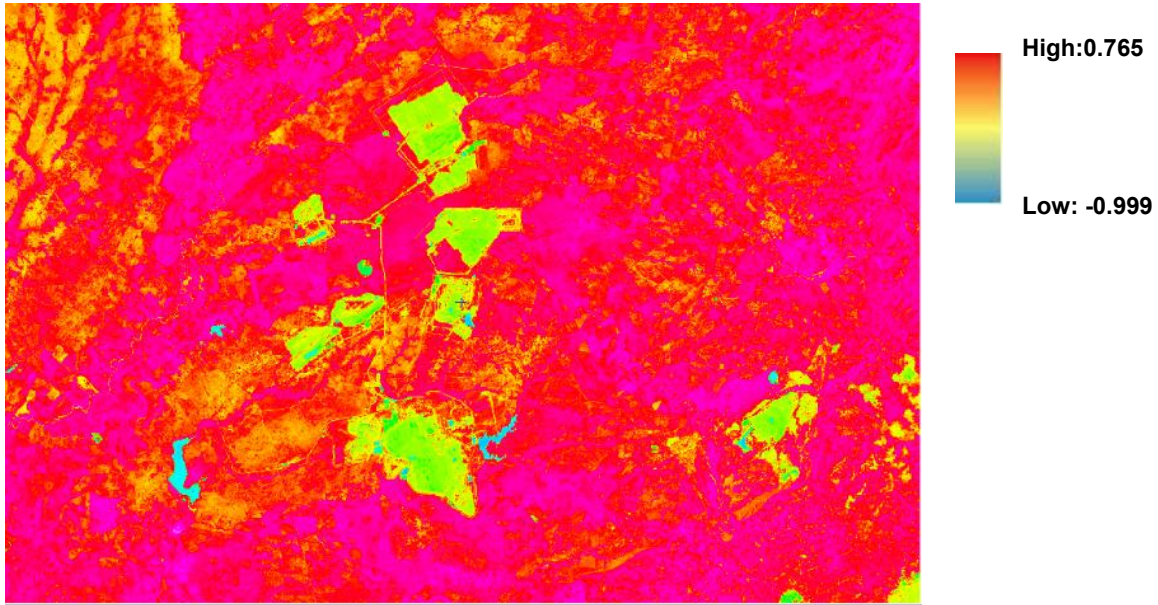


Figura 20. NDVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 22/12/2015

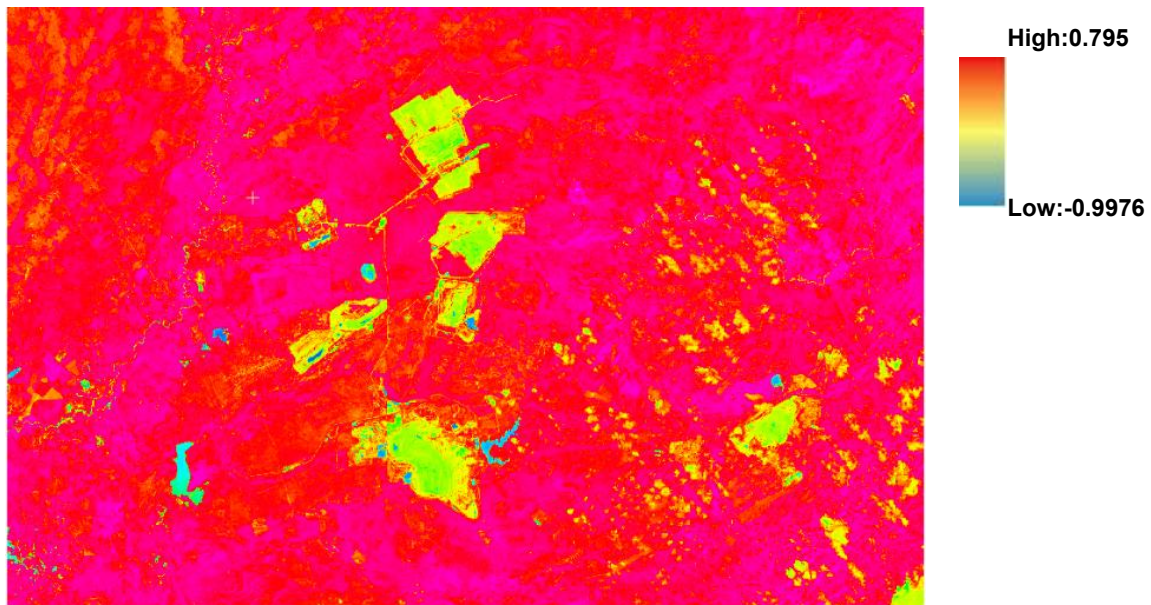


Figura 21. NDVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 24/12/2016

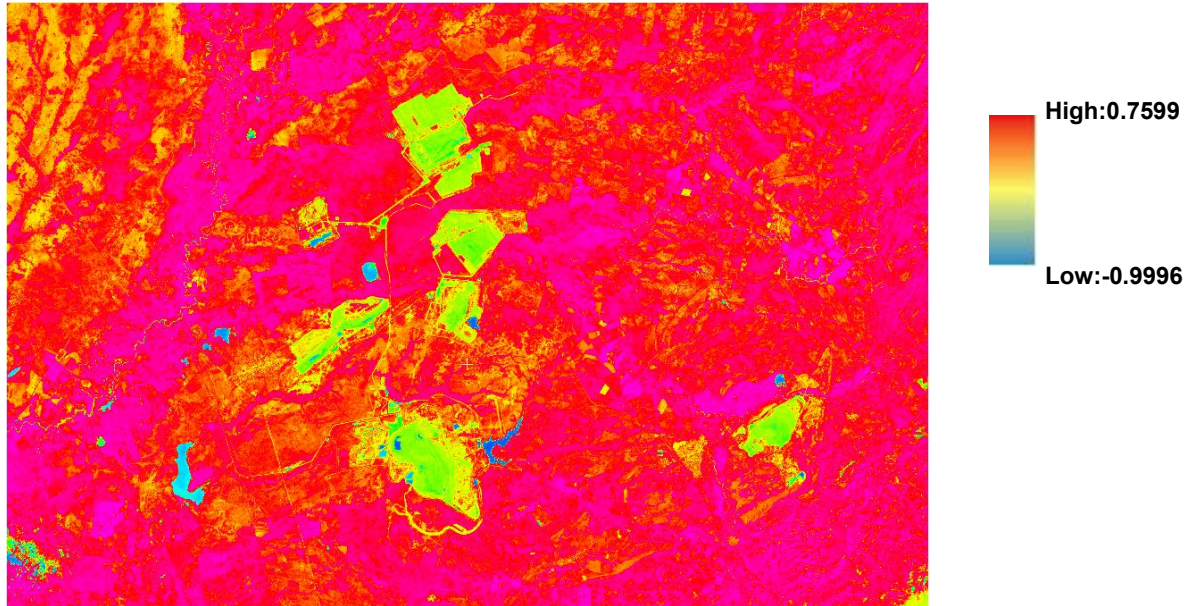


Figura 22. NDVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 27/12/2017

7.3. CALCULO DEL INDICE DE ESTRÉS HIDRICO

El cálculo del MSI se realizó en el programa PCI Geomáticos, utilizando la ecuación (2) en la calculadora ráster. **Figura 23**

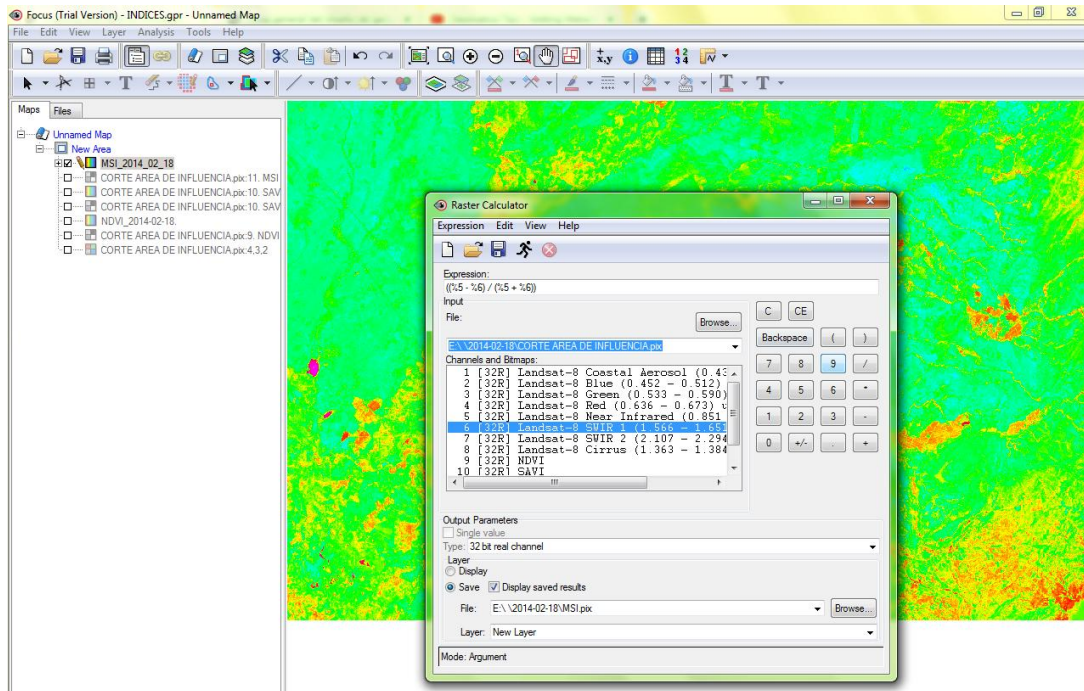


Figura 23. Cálculo del índice de estrés hídrico (MSI) en el programa PCI Geomatic.

Los valores mayores representan zonas húmedas, están representados por color rojo, los valores menores representan ausencia de agua, están representados por color azul celeste lo más bajos y amarillo los valores intermedios.

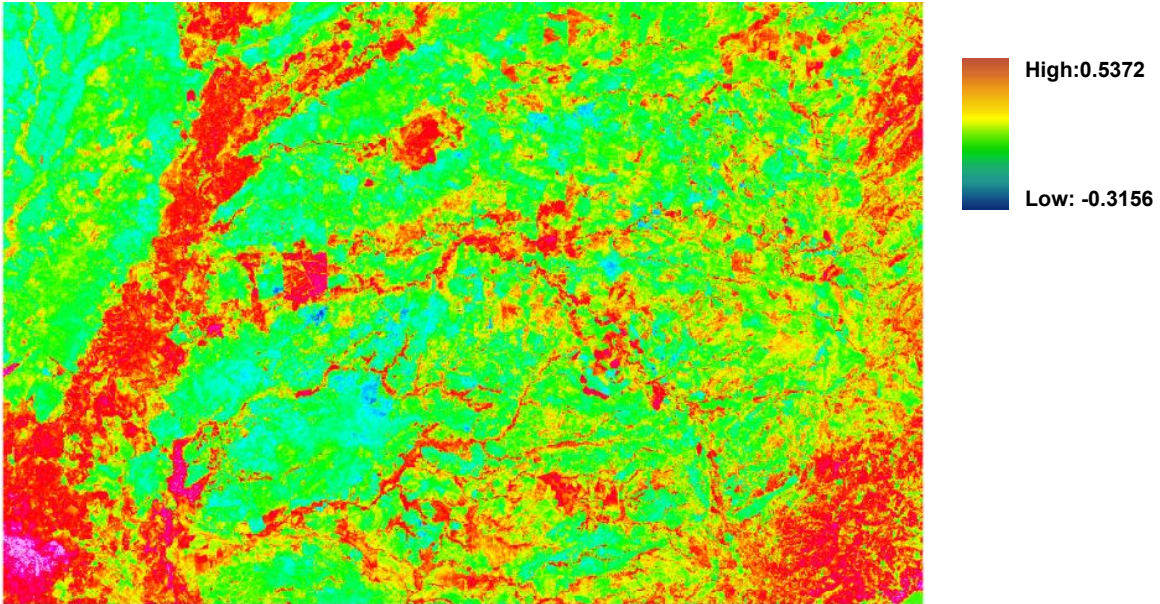


Figura 24. MSI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 30/12/1989

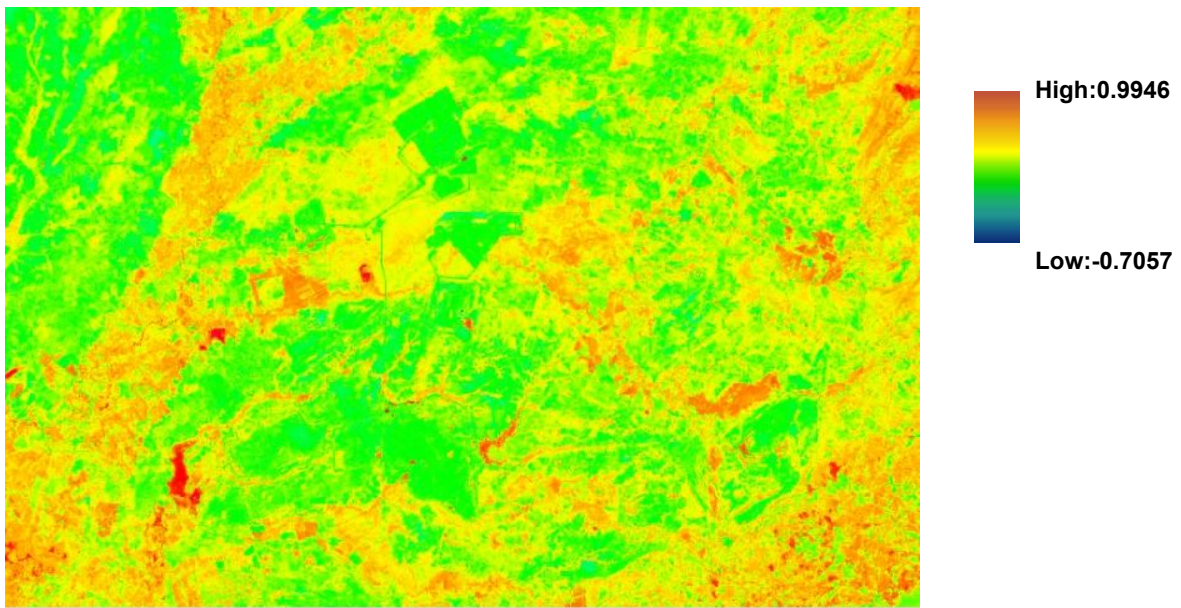


Figura 25. MSI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 19/12/2014

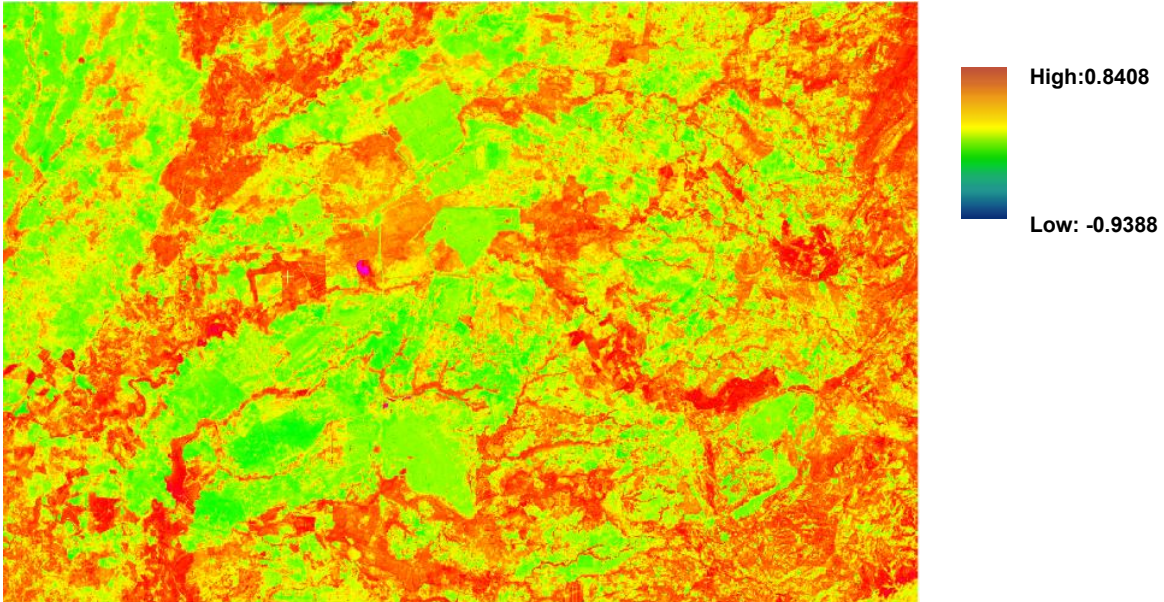


Figura 26. MSI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 22/12/2015

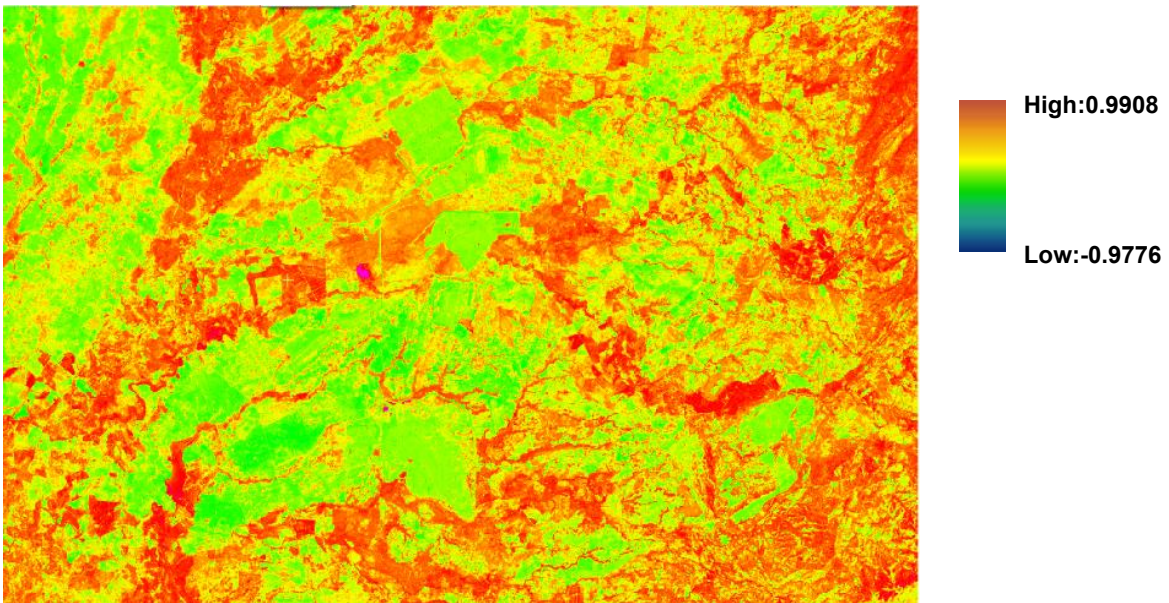


Figura 27. MSI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 24/12/2016

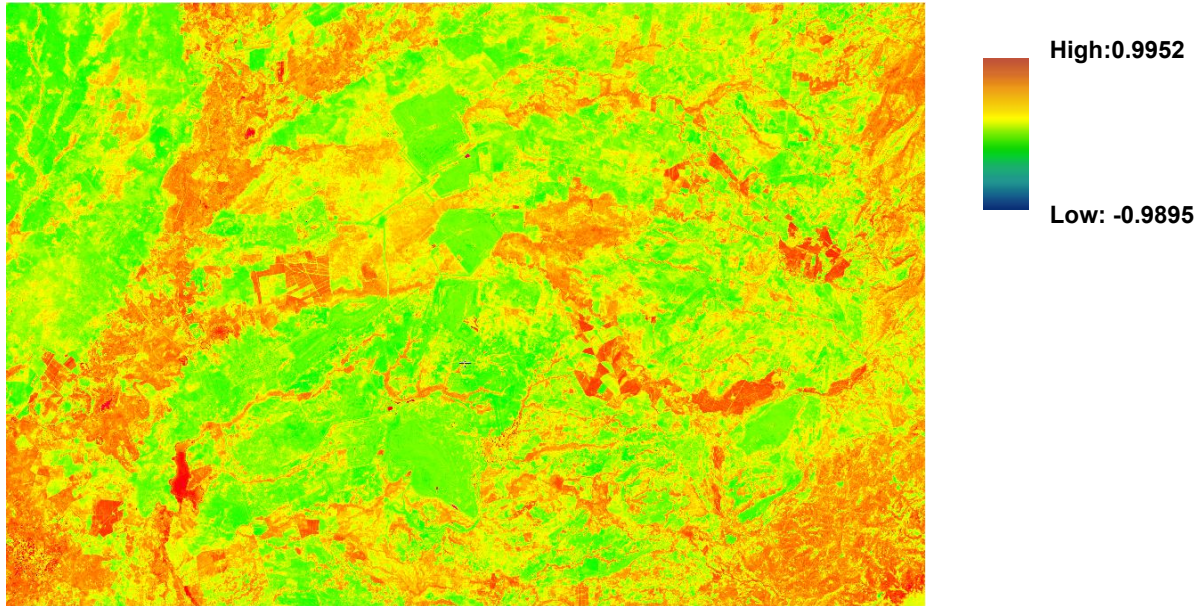


Figura 28. MSI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 27/12/2017

7.4. CALCULO DEL INDICE DE VEGETACION AJUSTADO AL SUELO

El cálculo del SAVI se realizó en el programa PCI Geomatics, utilizando la Ecuación (3) en la calculadora ráster como lo demuestra la **Figura 29** a continuación:

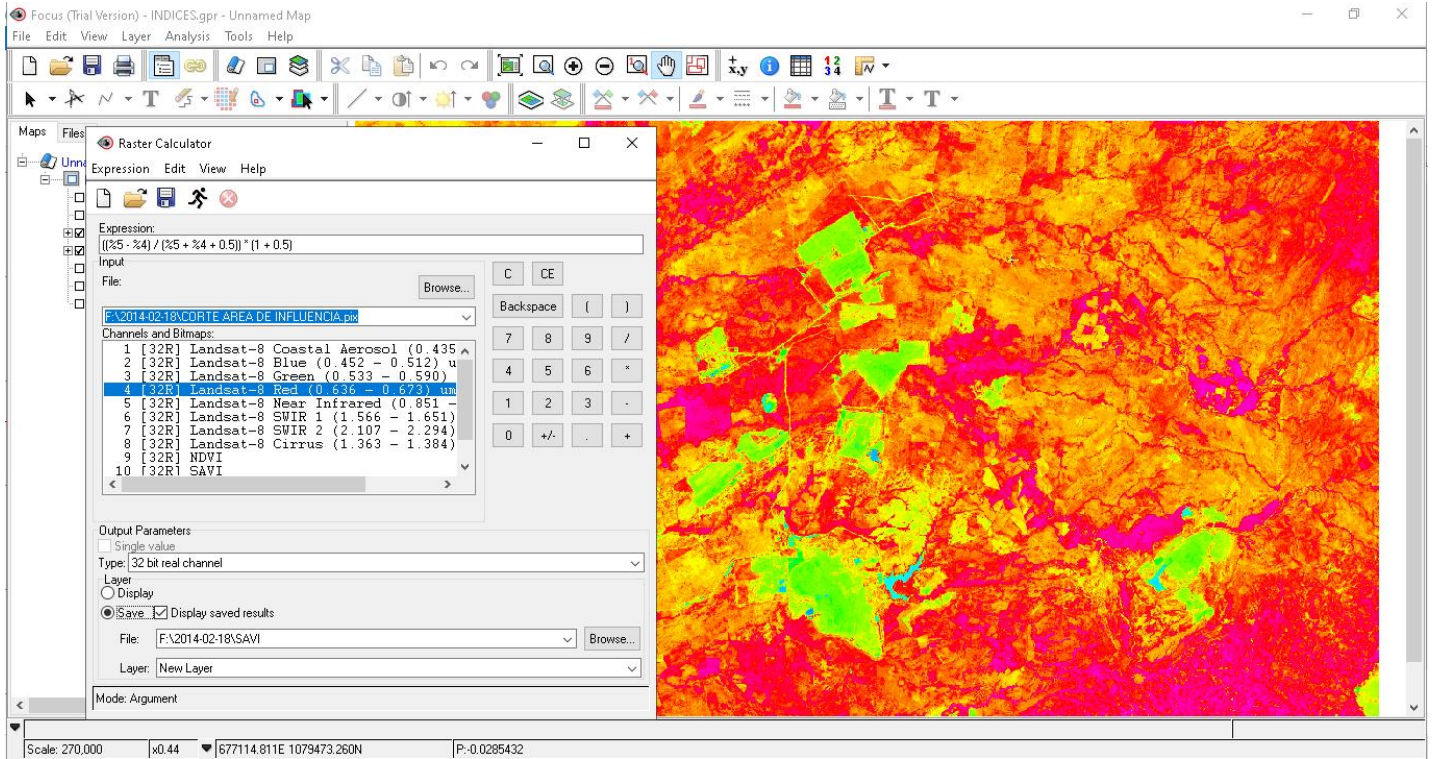


Figura 29. Cálculo del Índice NDVI en la Zona minera del departamento del Cesar en el Programa PCI Geomatics

Los valores negativos con zonas húmedas y el agua es representada por color azul, los suelos descubiertos y la vegetación rara serán representada por valores muy elevados y serán de color amarillo, la vegetación densa, húmeda y bien desarrollada serán de color fucsia y representan los mayores valores de SAVI

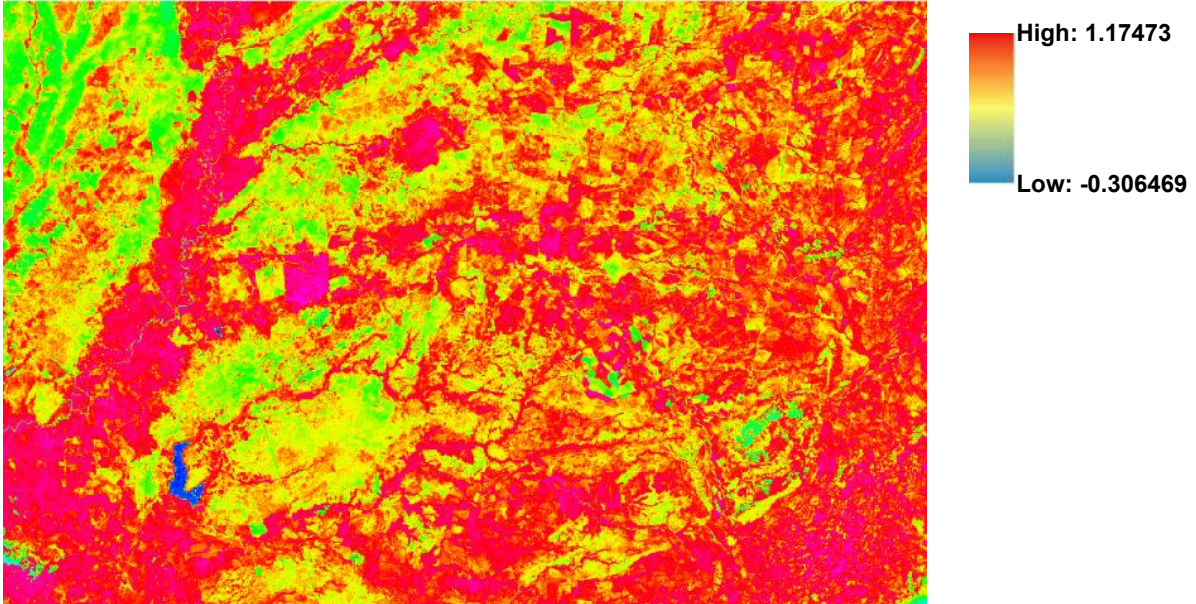


Figura 30. SAVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 30/12/1989

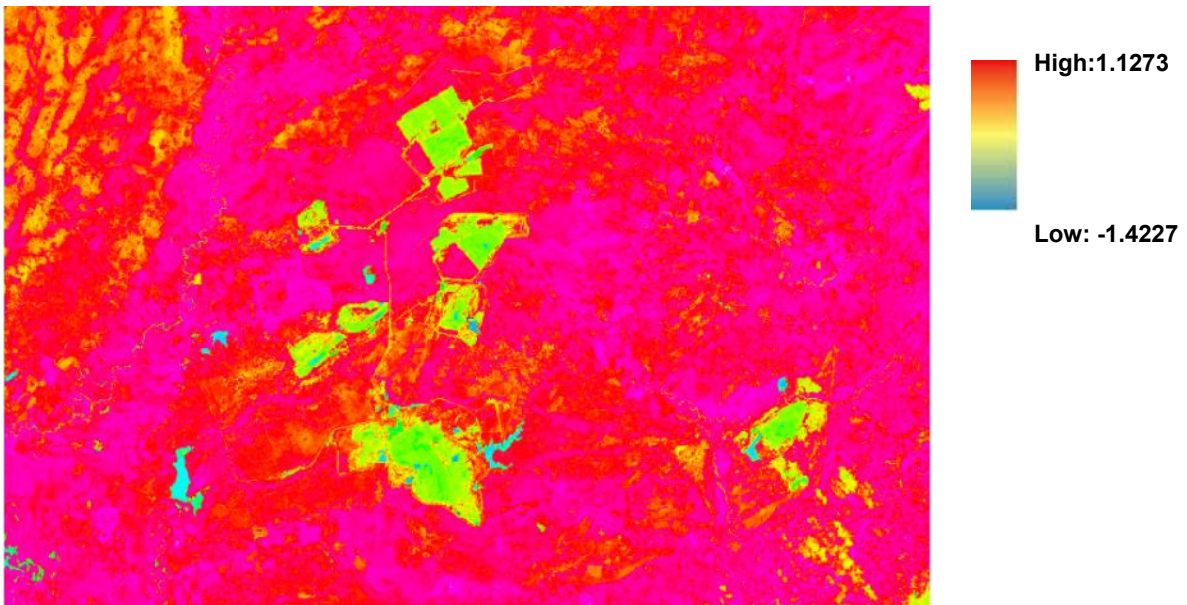


Figura 31. SAVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 19/12/2014

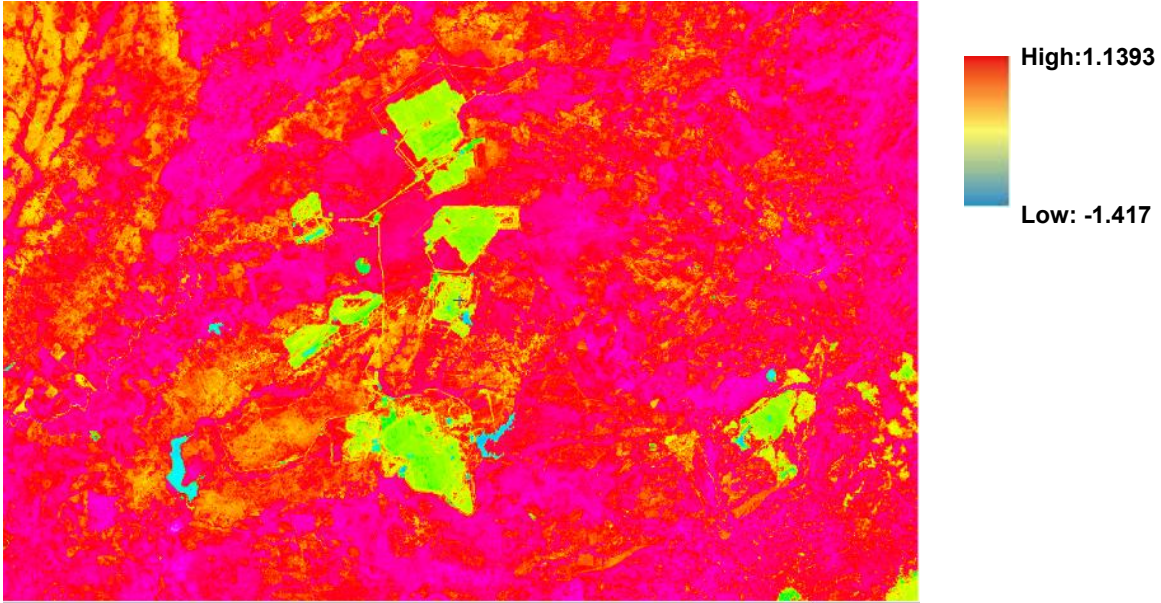


Figura 32. SAVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 22/12/2015

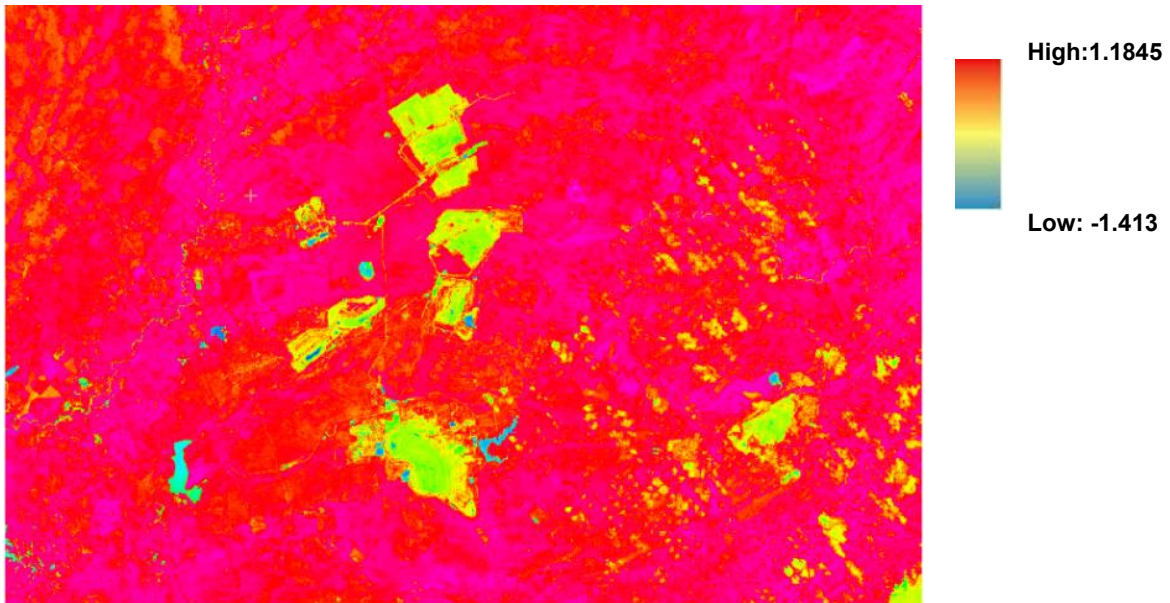


Figura 33. SAVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 24/12/2016

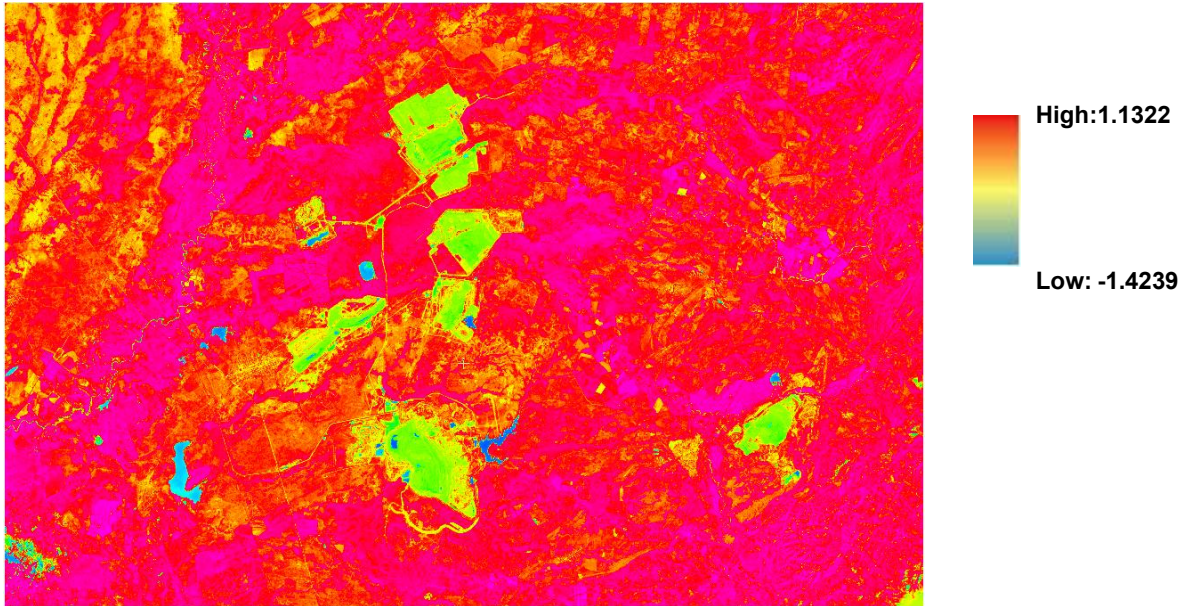


Figura 34. SAVI en la Zona de influencia minera del Departamento del Cesar 27/12/2017

7.5 ANALISIS DE CORRELACION

Los resultados arrojados por la correlación matemática entre el índice diferencial de vegetación normalizada (NDVI) y la temperatura superficial (TS) para cada uno de los años analizados denotan una correlación moderada indicando que existe un grado de dependencia significativo lo cual significa que la temperatura superficial depende en mediana proporción de la vegetación, ya que se entiende que en este factor también influyen varios componentes climatológicos como las precipitaciones y fenómenos climatológicos a los que se encuentra expuesta la región de estudio, la mayor correlación arrojada fue en el año 2017, y la menor en el año 2015, estos datos se encuentran expuesto a continuación en la **Tabla 7**.

FECHA	CORRELACION
1989_12_30	-0.60435
2014_12_19	-0.65232
2015_12_22	-0.72251
2016_12_24	-0.59903
2017_12_27	-0.53073

Tabla 7. Valores de correlación NDVI y TS

Fuente: Elaboración propia

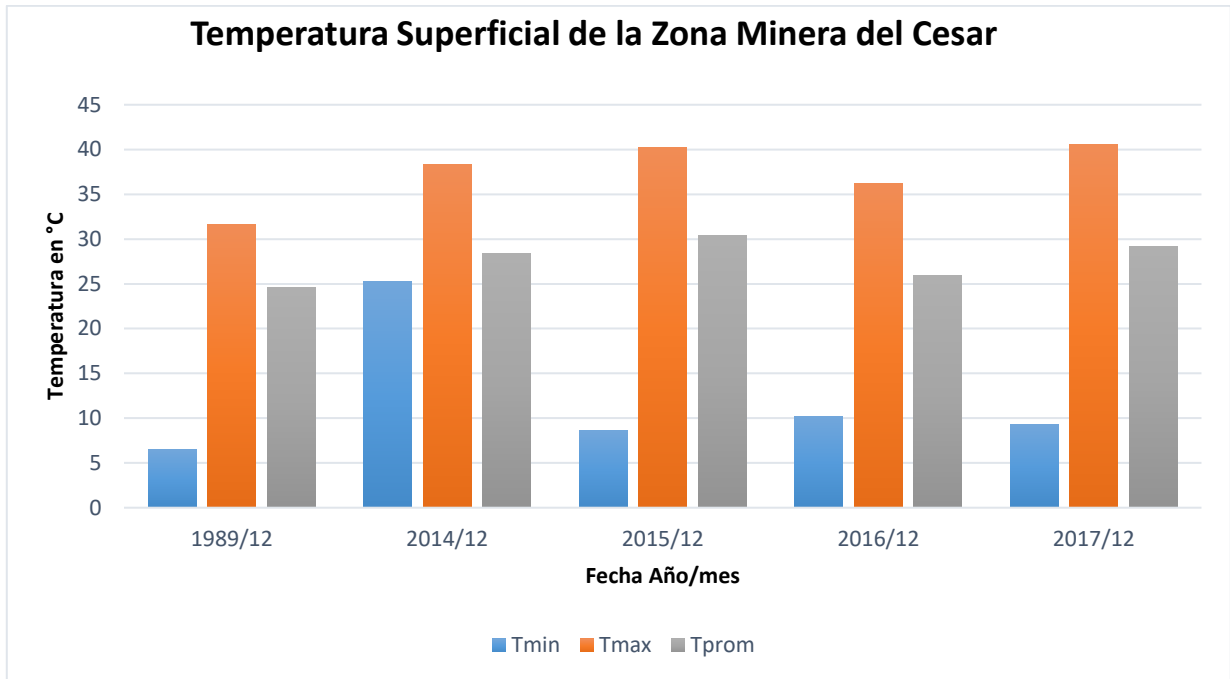
7.6. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones para la estimación de la temperatura superficial en la zona minera del Departamento del Cesar para cada uno de los periodos seleccionados se resumen a continuación en la **Tabla 8**. Se representa la temperatura mínima, máxima y promedio en grados Celsius. Para observar las imágenes de Temperatura Superficial ir a las **Figura 12**, **Figura 13**, **Figura 14**, **Figura 15** y **Figura 16**.

Fecha	Tmin	Tmax	Tprom
1989_12_30	6.50	31.64	24.54
2014_12_19	25.26	38.35	28.35
2015_12_22	8.63	40.28	30.41
2016_12_24	10.24	36.24	25.94
2017_12_27	9.32	40.53	29.20

Tabla 8. Temperaturas Superficiales para la Zona minera del Cesar en °C

Fuente: Elaboración propia



La información obtenida demuestra que existe un incremento de temperatura en la zona minera del departamento del Cesar entre los años 1989 y 2017. Sin embargo, este incremento puede relacionarse a múltiples factores como los cambios normales de temperatura entre las épocas del año debido a factores climáticos como fenómenos de lluvia o sequía. Las precipitaciones son un factor que influye considerablemente en el cálculo del índice de temperatura superficial. En el Departamento del Cesar, las precipitaciones son muy variables en el año (Figura 35) y también según la época climática.

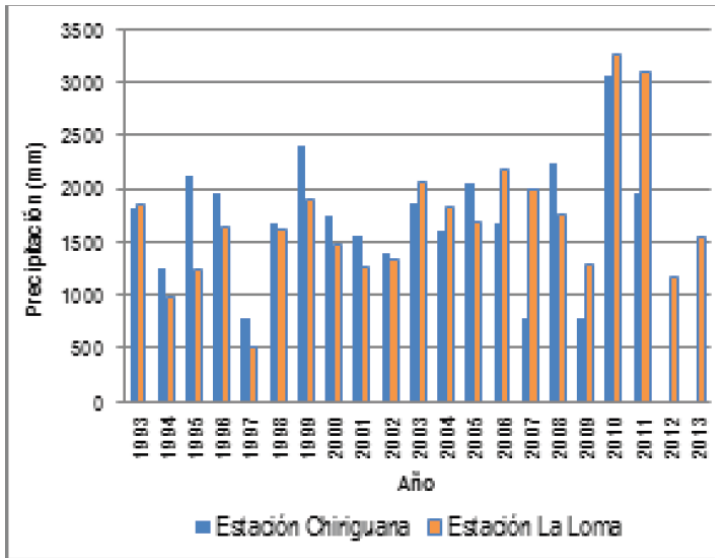


Figura 36. Precipitación total anual del área de estudio.
Fuente: IDEAM, 2015.

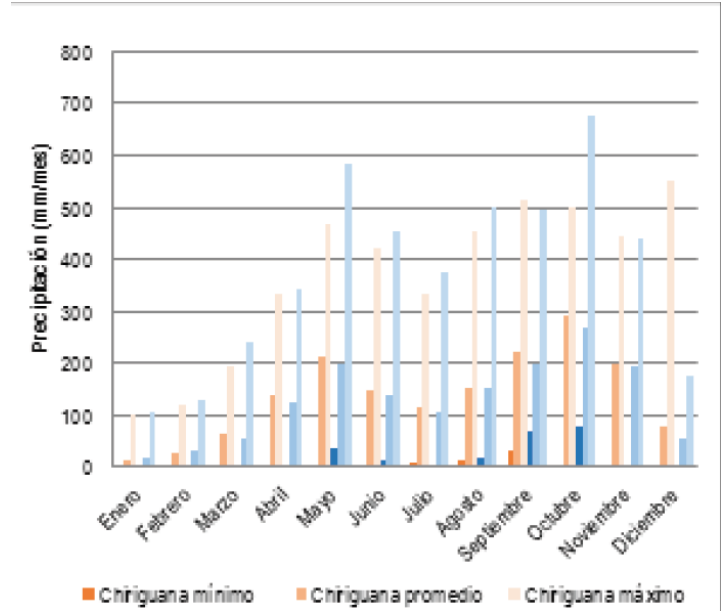


Figura 35. Precipitaciones máximas, mínimas y promedios mensuales. Fuente: IDEAM, 2015.

El régimen de precipitación que predomina en la zona minera de Cesar es bimodal ver **Figura 36** con dos periodos lluviosos, en el primer semestre corresponde a los meses de abril y mayo, y septiembre y octubre en el segundo semestre. El periodo seco más acentuado a nivel hidrológico inicia en diciembre y se extiende hasta el mes de marzo (IDEAM – 2015).

7.6.1. INFLUENCIA DE LOS FENOMENOS CLIMATOLOGICOS

La zona minera del departamento del cesar se encuentra bajo influencia del fenómeno climatológico de la corriente oceánica (Oscilación del Sur – ENOS), estos cambios en la superficie del océano pacifico cubren grandes extensiones y por su magnitud afecta el clima en diferentes regiones del planeta entre ellas, el norte de

INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

Suramérica donde está situado el territorio colombiano más específicamente la región caribe; los componentes oceánicos del ENOS llamados Niño a la aparición interanual de aguas superficiales relativamente más cálidas y Niña a la aparición de aguas superficiales más frías de lo normal. (Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, IDEAM)

A continuación, (**Tabla 9**) se detallará la información suministrada por el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, DANE de estos cambios climáticos en el mes de diciembre de los diferentes años del estudio del proyecto en Colombia, para poder analizar de forma objetiva la variabilidad climática en la zona minera del departamento del cesar.

Tabla 9. Condiciones climatológicas en el mes de diciembre, Boletines de monitoreo Fenómeno el Niño y la Niña, IDEAM.

Año	Características climatológicas
1989	Se presentaron condiciones de temperatura normales en el océano pacifico, lo cual no determino la aparición de los fenómenos conocidos como “Niño” y “Niña”. Sin embargo, en el año anterior se presentó uno de los fenómenos del niño con valores promedio por encima de los históricos, lo cual determino que en 1989 se presentaran temperaturas máximas más altas y precipitaciones mas bajas de lo normal.
2014	En el mes de diciembre del 2014 comenzó la temporada seca después de la transición de una temporada lluviosa, empieza a presentarse escases de lluvias, también se presentó una disminución de la temperatura superficial del mar en el océano pacifico, mostrando de esta forma una transición de los umbrales típicos “El niño” hacia condiciones normales.
2015	En el mes de diciembre persistió un comportamiento deficitario de las lluvias, con volúmenes muy bajos en la región caribe, con cantidades de precipitación entre el 10% y 40% de lo que normalmente llueve. En el departamento del cesar se presentaron valores de temperatura muy por encima de los promedios.

2016	Se presentó el fenómeno de la “Niña” en el océano pacifico, lo cual determino mayores precipitaciones de lo usual en el mes de diciembre, las lluvias en la región caribe continental se comportaron entre normal y ligeramente por encima de los promedios históricos en la región
2017	Se presentaron condiciones normales en las temperaturas del océano pacifico, demostrando la ausencia de un fenómeno climatológico determinado. En el mes de diciembre como es usual se observó déficit de lluvias en la región caribe dentro de los promedios históricos normales.

7.7. ESTIMACION DEL NDVI

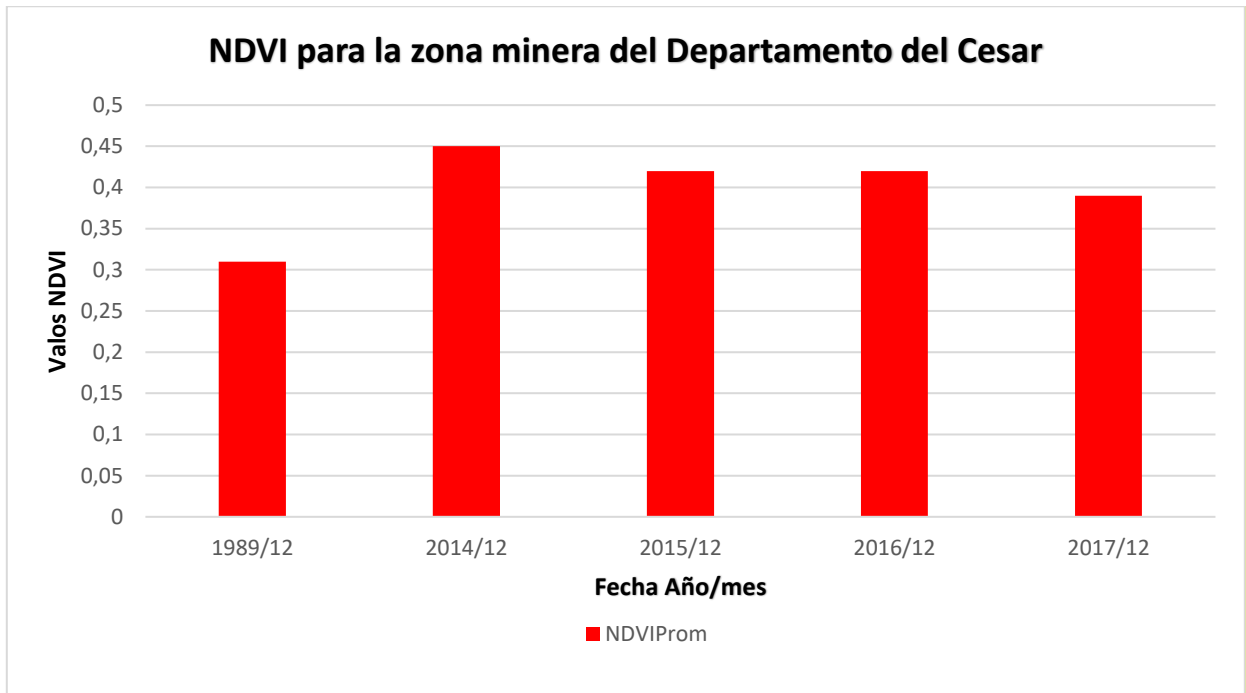
Los resultados de los valores promedio del Índice de vegetación diferencial normalizado de cada año seleccionado en la Zona de Influencia minera del Cesar se ven reflejados a continuación en la **Tabla 10**. Las imágenes procesadas de NDVI se encuentran en la **Figura 18**.

Tabla 10. NDVI para la zona minera del Departamento del Cesar.

Fecha	NDVImin	NDVImax	NDVIprom
1989_12_30	-0.2078	0.7895	0.31
2014_12_19	-0.99	0.7571	0.45
2015_12_22	-0.9997	0.7651	0.42
2016_12_24	-0.9976	0.7955	0.42
2017_12_27	-0.9996	0.7599	0.39

Según los resultados obtenidos mediante la aplicación de la fórmula para la obtención del NDVI demuestran que la intensidad de la vegetación ha disminuido en el transcurso del periodo de 2014 a 2017 a excepción de 2016 que se mantiene igual. Sin embargo, esto no significa que el porcentaje de vegetación sea el mismo,

ya que este índice también tiene en cuenta la madurez y salud de la misma; El valor de NDVI más alto se dio en 1989.

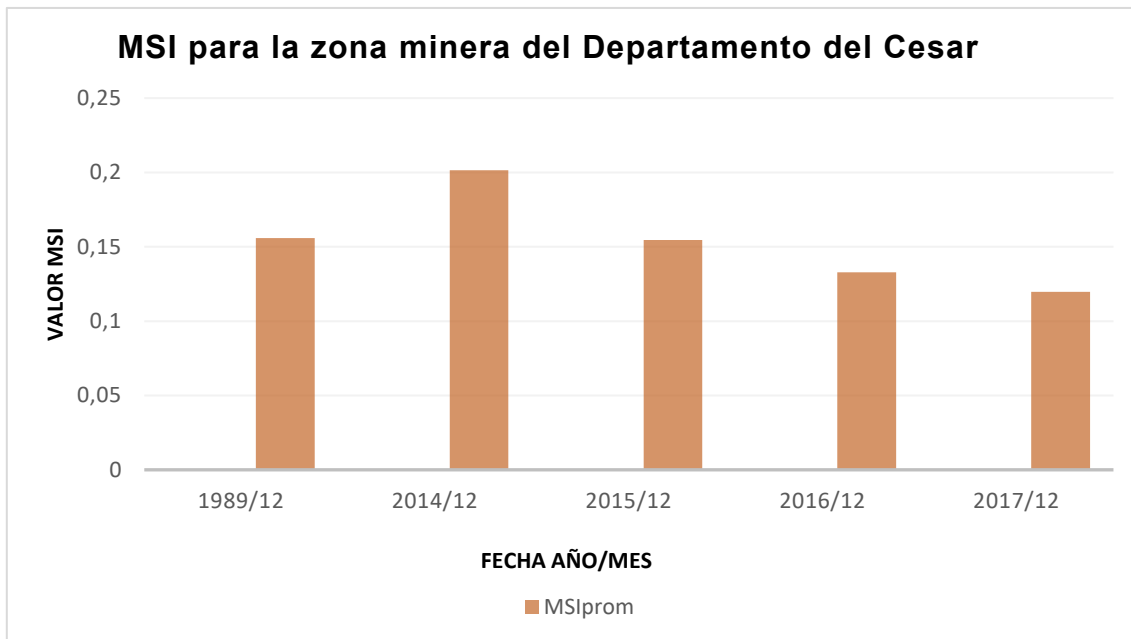


7.8. ESTIMACION DE MSI

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones para la estimación del índice de estrés hídrico en la zona minera del Departamento del Cesar para cada uno de los periodos seleccionados se resumen a continuación en la **Tabla 11**. Se representa el MSI mínimo, máximo y promedio. Para observar las imágenes del Índice MSI ir a la **Figura 24**.

Tabla 11. MSI para la zona minera del Departamento del Cesar.

Fecha	MSImin	MSImax	MSIprom
1989_12_30	-0.3156	0.5372	0.1558
2014_12_19	-0.7057	0.9946	0.2015
2015_12_22	-0.9388	0.8408	0.1545
2016_12_24	-0.9776	0.9908	0.1328
2017_12_27	-0.9895	0.9952	0.1198



La información obtenida demuestra que el valor de MSI ha disminuido en el transcurso del periodo de 2014 a 2017, lo que significa un deterioro en las condiciones naturales de la planta debido a la pérdida de agua lo que sugiere poca absorción debido a la poca humedad aprovechable del suelo. También se puede observar que los mejores valores de NDVI máximos y mínimo corresponden al año 1989.

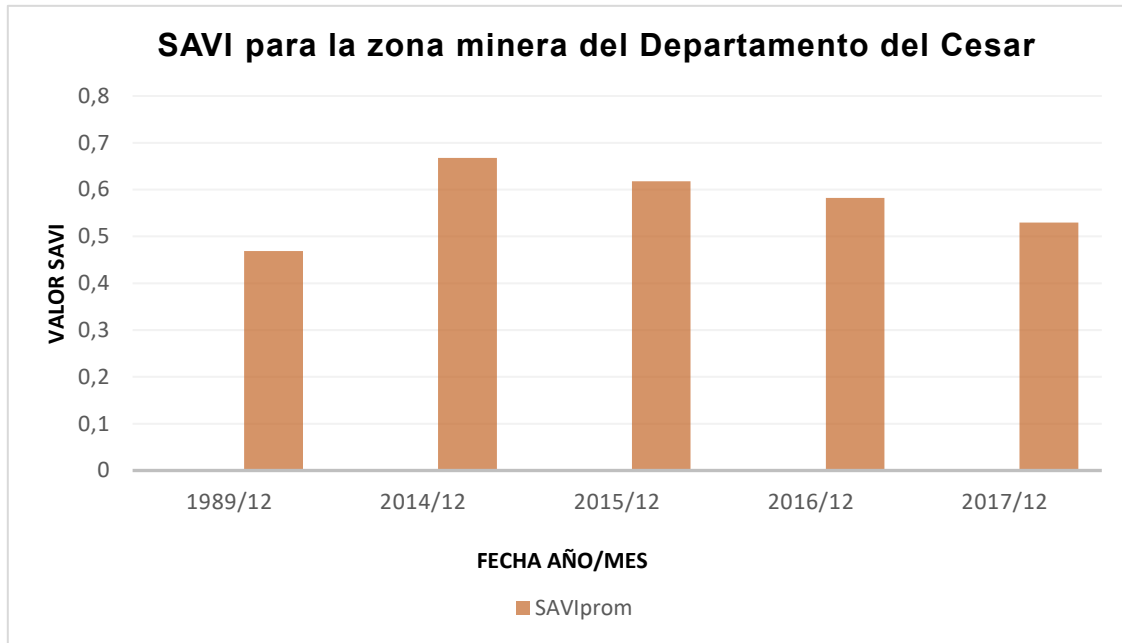
7.9. ESTIMACION DE SAVI

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones para la estimación del índice de vegetación ajustado al suelo en la Zona de Influencia minera del Cesar para cada uno de los periodos seleccionados se resumen a continuación en la **Tabla 12**. Se representa el SAVI mínimo, máximo y promedio. Para observar las imágenes de Temperatura Superficial ir a la **Figura 30**.

Tabla 12. SAVI para la zona minera del Departamento del Cesar.

Fecha	SAVimin	SAVimax	SAVIprom
1989_12_30	-0.3064	1.1747	0.4687
2014_12_19	-1.4227	1.1273	0.6678
2015_12_22	-1.417	1.1393	0.6177
2016_12_24	-1.413	1.1845	0.5823
2017_12_27	-1.4239	1.1322	0.5299

La información obtenida demuestra que el valor del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) ha disminuido en el transcurso del periodo de 2014 a 2017. Esto se debe al detrimento de las zonas con vegetación desarrollada sujeta a buenas condiciones de suelos, junto con el NDVI, demuestran que las coberturas vegetales en la zona de estudio se encuentran en constante disminución, también se puede observar que los mejores valores de SAVI máximos y mínimo corresponden al año 1989.



8.DETERMINACION DE ZONAS CON MAYORES VALORES

Para establecer los sectores que están sometidos a mayores cambios en los índices de variabilidad climática se realizó un procedimiento en el Programa ArcGis 10.5, en el cual se dividió la zona de influencia minera del estudio por los municipios que la conforman en donde se ubicaron los puntos localizados donde el comportamiento de las variables muestra los valores más altos del análisis. Estos puntos se visualizan a continuación:

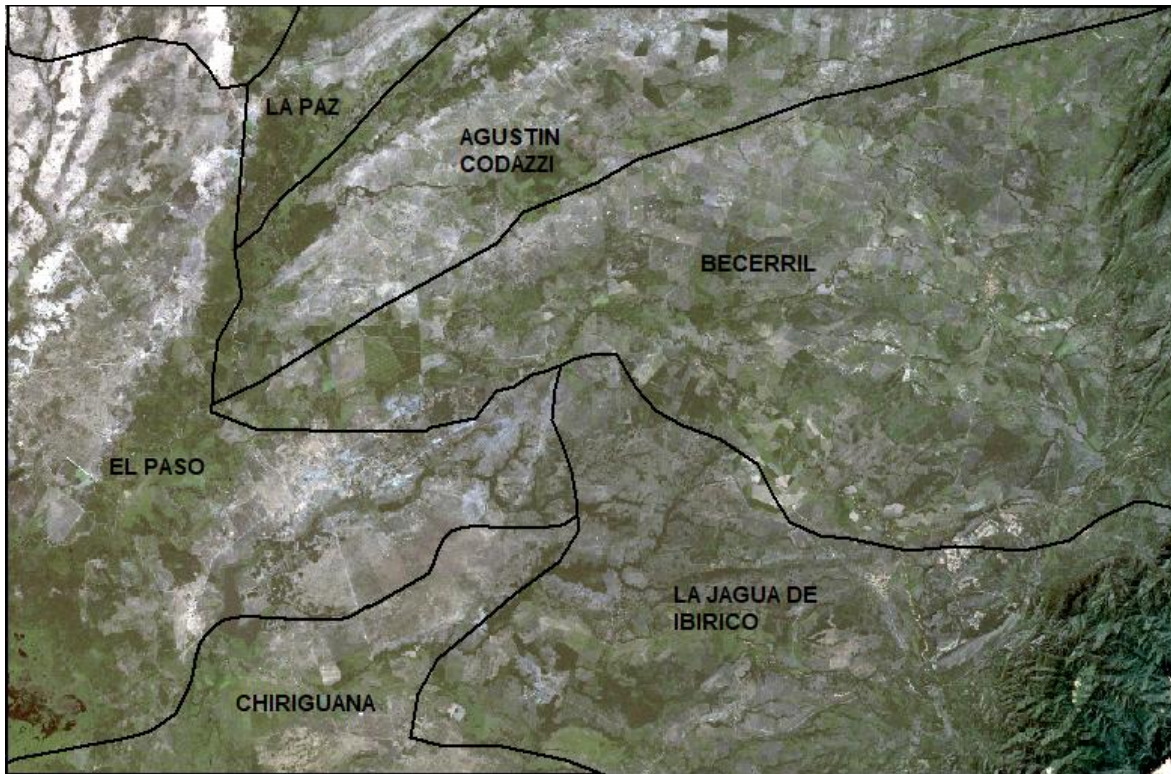


Figura 37. División municipal en la Zona minera del departamento del Cesar en 1989.

A continuación, se representa mediante la **Tabla 13**. Los valores máximos de cada uno de los índices de variabilidad climática estimados para cada uno de los municipios con el propósito de estimar cual es el más afectado por la actividad minera como uno de los factores principales que inciden en el aumento de las variables estudiadas.

MUNICIPIO	1989/12				2017/12			
	TS	NDVI	MSI	SAVI	TS	NDVI	MSI	SAVI
LA PAZ	29,42	0.34	0.18	0.44	36,25	0.41	0.14	0.49
EL PASO	30,26	0.37	0.22	0.47	39.48	0.44	0.18	0.53
BECERRIL	29.05	0.32	0.18	0.41	35,13	0.39	0.14	0.47
AGUSTIN CODAZZI	30.03	0.35	0.21	0.45	32,25	0.42	0.17	0.51
LA JAGUA DE IBIRICO	27,46	0.33	0.17	0.40	30,87	0.40	0.13	0.45
CHIRIGUANA	29.92	0.34	0.19	0.46	35.17	0.41	0.15	0.51

Tabla 13. Valores promedio de los Índices Ambientales de Variabilidad en cada municipio.

El municipio con valores mas criticos en el analisis es el municipio El Paso, cuenta con amplios sectores descubiertos de cobertura vegetal, lo cual determina que presente las mayores temperaturas superficiales. A pesar de que no tiene en su territorio las minas de explotacion minera, puede ser perjudicado por factores de viento que arrastran el material particulado proveniente de las actividades mineras.

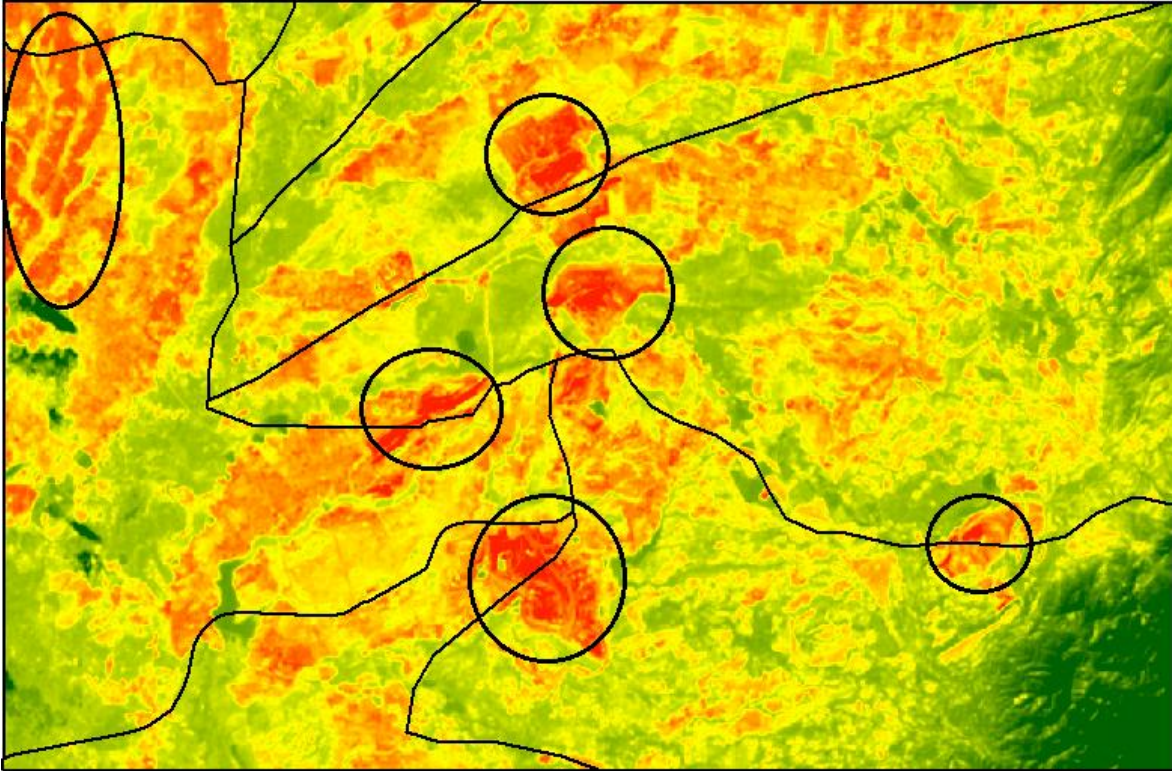


Figura 38. Zonas que representan los mayores valores de TS, año 2017.

Los mayores valores de temperatura en la zona estudiada corresponden a las zonas de explotación directa, socavones, con temperaturas máximas de 40,53 °C, le sigue una zona desértica en el municipio del Paso con una temperatura máxima de 30,26 °C. se elaboró un mapa **Figura 39** de la temperatura superficial en la zona minera del Departamento del Cesar, donde especificara la temperatura máxima y mínima de la región en estudio.

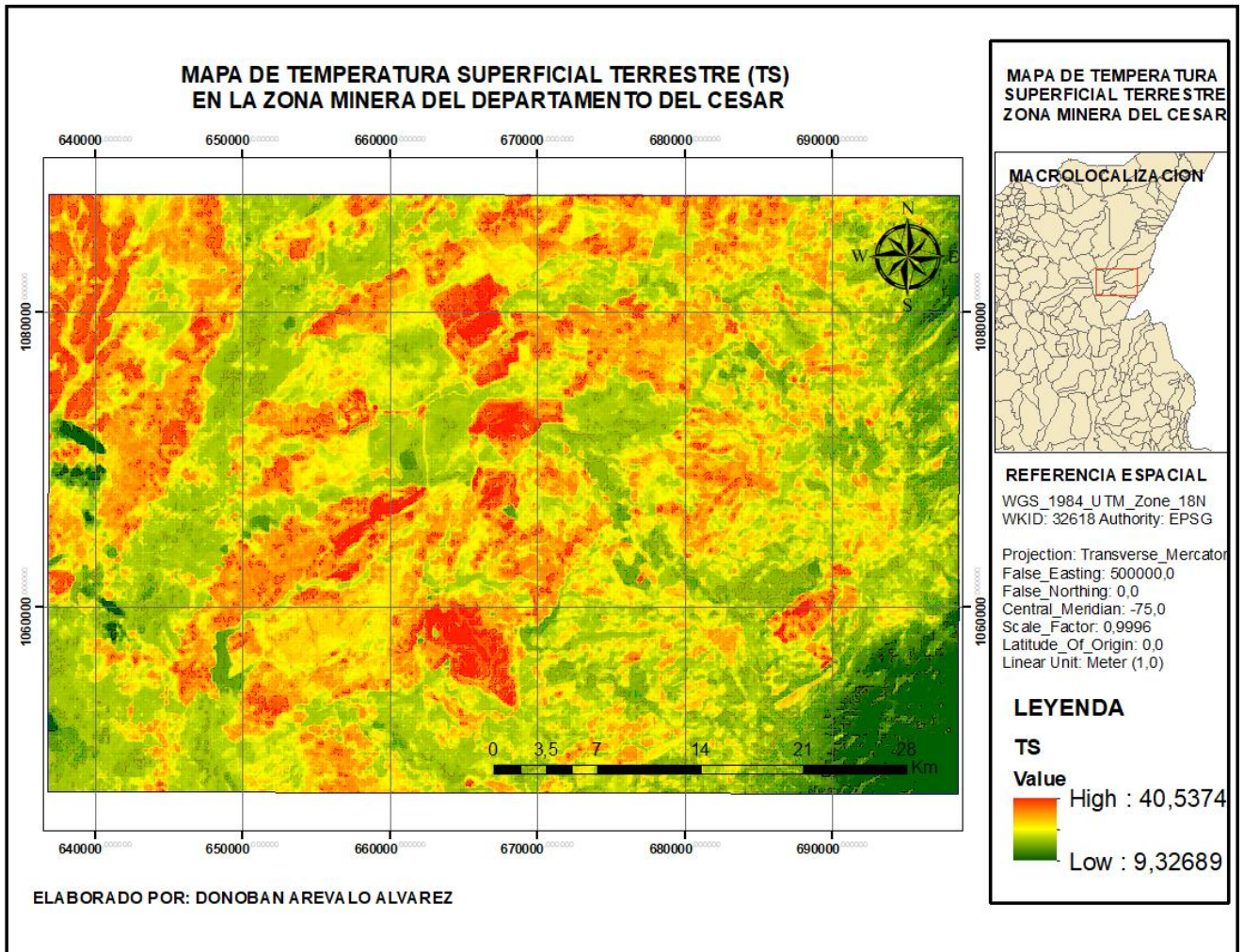


Figura 39. Mapa de Temperatura superficial (TS) en la zona minera del cesar, 12/2017.

9. CONCLUSIONES

En general se puede concluir que en la Zona minera del Departamento del Cesar se está generando un incremento de la temperatura superficial de hasta 5 °C desde 1989 hasta 2017. Esto se debe principalmente al deterioro de las coberturas vegetales que han ido en detrimento con el avanzar de los años según el análisis de los índices NDVI y SAVI. Las zonas con vegetación densa alejadas de los puntos de extracción de carbón han ido disminuyendo drásticamente por el déficit existente de la humedad en los suelos, cabe resaltar que esto provoca una disminución en la calidad de vida de los habitantes en zonas pobladas por el aumento de enfermedades relacionadas a el calor, por otra parte, esto tendrá un efecto en la temperatura atmosférica.

En cuanto a la correlación existente entre la temperatura superficial y el índice de vegetación diferencial normalizado, se puede establecer que poseen una correlación moderada. Esto quiere decir que la temperatura superficial depende en mediana proporción de la vegetación, ya que se entiende que en este factor también influyen varios componentes climatológicos como las precipitaciones y fenómenos climatológicos cíclicos anuales como el Niño y la Niña. Entendiendo que la temperatura superficial depende en cierto grado del estado y cantidad de la vegetación presente en región de estudio, esto indica que es posible implementar una solución a la disminución de la TS en cierta medida. Elaborando un estudio detallado de las coberturas vegetales en la zona de influencia minera para correlacionarlo con el cambio de la temperatura y determinar qué tipo de cobertura es más favorable.

En el año 2016 se dio la presencia de uno de los factores determinantes de las condiciones climatológicas en la zona minera del Departamento del Cesar, el fenómeno climático de la Niña causó mayores precipitaciones de los promedios

históricos de la región y altero los comportamientos normales de las condiciones naturales por tal motivo los valores de los diferentes índices para este año se comportaron diferente a la línea de tendencia esperada. De igual forma ocurrió en el año 1989 a causa del fenómeno del Niño presente en el año anterior y que repercutió en los valores de los índices ambientales de variabilidad climática.

En cuanto a la determinación de las zonas con mayores cambios en las variables estudiadas, se logró establecer que el municipio de El Paso presenta los mayores valores en los índices de temperatura y menores índices de calidad y cantidad de vegetación, es preciso señalar que este municipio posee en su territorio una mínima zona de explotación directa de carbón en comparación con otros municipios, lo cual puede significar que existen factores secundarios a la actividad minera como el transporte del carbón por las vías que atraviesan este municipio o incluso a los vientos provenientes de la serranía del Perijá situada a pocos kilómetros en la cordillera de los Andes. Otro de los municipios que arrojó mayores valores fue Agustín Codazzi, en el cual este se encuentra una de los puntos de explotación de carbón más grandes de la Zona minera del Cesar.

En conclusión, no se puede afirmar con certeza si las variaciones negativas de los índices estudiados en este proyecto de investigación seguirán en aumento, o, por otro lado, si existe una relación directa con las actividades mineras que se desarrollan en la región. A pesar de ello, se cumplieron a cabalidad los objetivos propuestos inicialmente, dando como resultado mapas de temperatura superficial y estado de la cobertura vegetal entre los años 1989 y 2017 que pueden ser utilizados para un posterior análisis en donde se busque mitigar las problemáticas ambientales existentes en la región minera del Departamento del Cesar.



INGENIERÍA

AMBIENTAL Y SANITARIA

10. BIBLIOGRAFIA

- Alarcón L. Edgardo. (2009). La minería como industria de productos
- Álvarez Mendoza, C. I. (2014). Estimación de contaminación del aire por PM10 en Quito determinado por índices ambientales obtenidos con imágenes satelitales LANDSAT ETM+. Sangolqui (Ecuador): Universidad de las fuerzas armadas ESPE.
- Álvaro Vega Guzmán, José López García, Lilia de Lourdes Manzo Delgado. (2008). Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México.
- Anaya Acevedo, Duque Londoño, Valencia Hernández. (2008). Análisis de textura en imágenes satelitales en el ámbito de la biodiversidad y la estructura en un bosque de los Andes colombianos.
- ANLA. (2015). Reporte sobre la Zona minera del centro del Cesar. Autoridad Nacional de Liciencias Ambientales, Colombia.
- APN - Administración de Parques Nacionales - Sistema de Información de Biodiversidad (APN – SIB). 2005. Protocolo para el pre procesamiento de imágenes satelitales Landsat para aplicaciones de la administración de parques nacionales. Buenos Aires – Argentina. 21 p.
- Bense, T. 2007. Tutorial - Introducción a la Percepción Remota. Sextas Jornadas de Educación en Percepción Remota en el Ámbito del Mercosur y Primeras Uruguayas, noviembre 2007.
- Cañas Ramos, E. E. (2008). Diagnóstico de la calidad de aire en la zona minera del Cesar.

Carlos Gonzaga Aguilar (2014). Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador. Universidad Nacional de la Plata – Argentina.

China, J. 2002. Teledetección del bosque. Editorial Tecnológica, Cartago, Costa Rica.

Chuvieco, E. 1998. El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. Revista de Teledetección N.º 10. 1-9.

Chuvieco, E. 2008. Teledetección Ambiental 3ra edición. Barcelona España: Editorial Ariel S.A. 595 p.

Esperanza, F y Zerda, H. 2002. Potencialidad de los índices de vegetación Para la discriminación de coberturas forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales, Santiago del Estero, 2002.

García, C. E., & Herrera, F. A. (2015). Percepción remota en cultivos de caña de azúcar usando una cámara multiespectral en vehículos no tripulados. Cali.

Gobierno federal de México. (2009). Cambio Climático. Ciencia, Evidencia y Acciones.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, Tiempo y Clima, Boletines de seguimiento el Fenómeno El Niño y la Niña.

IPCC, (2007) Climate change 2007: Summary for policymakers. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 12-17 November 2007. 22 pp

Luengo, G. (s.f.). Elementos para la definición y evaluación de la calidad ambiental urbana. Una propuesta teórico-metodológica. Venezuela.

Ministerio de Ambiente de Colombia. (2015). Guía para incluir la variable de cambio climático en proyectos, obras, o actividades nuevas sujetas a licenciamiento ambiental.

Presidencia de la Republica de Colombia. (2004). Reglamento General de Procedimientos de Evaluación de Impacto Ambiental. Bogotá.

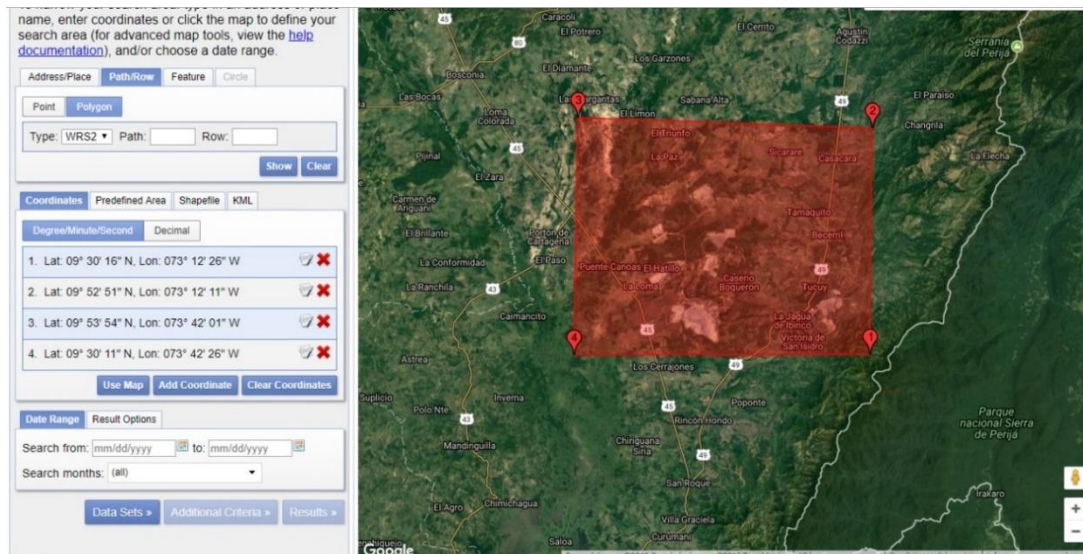
Santana Rodríguez, L. M., Escobar Jaramillo, L. A., & Capote, P. A. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. Cali (Colombia): Universidad Del Valle.

Santiago Trujillo Uribe, (2012). estimación de temperatura superficial en el valle de Aburrá mediante técnicas de percepción remota. Escuela de Ingeniería de Antioquia – Envigado.

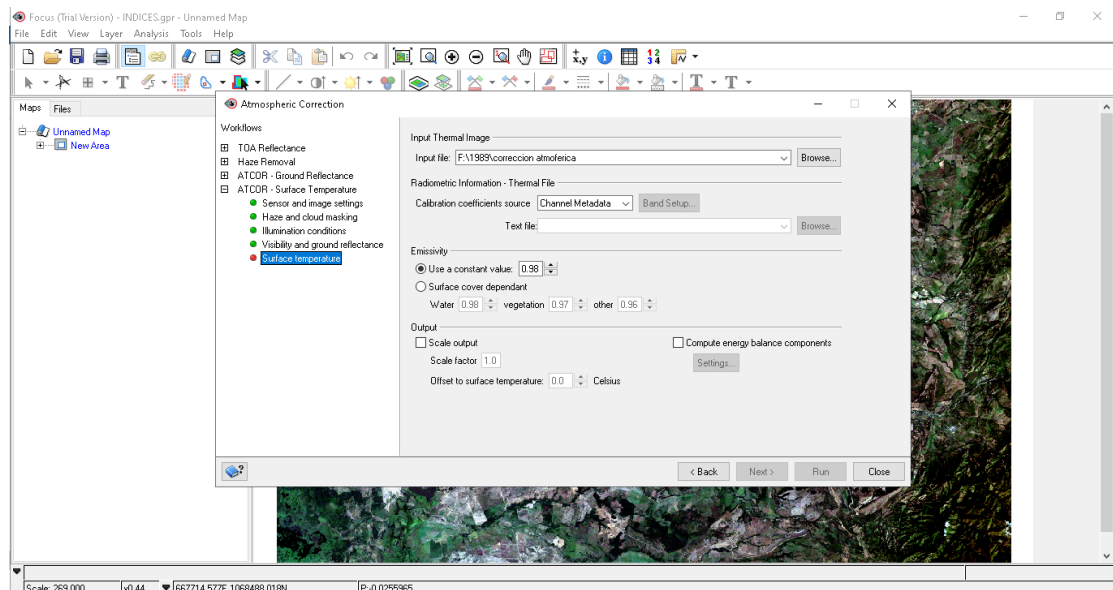
Sigmur. 2006. Universidad de Murcia. SIG y Teledetección. Murcia – España

11. ANEXOS

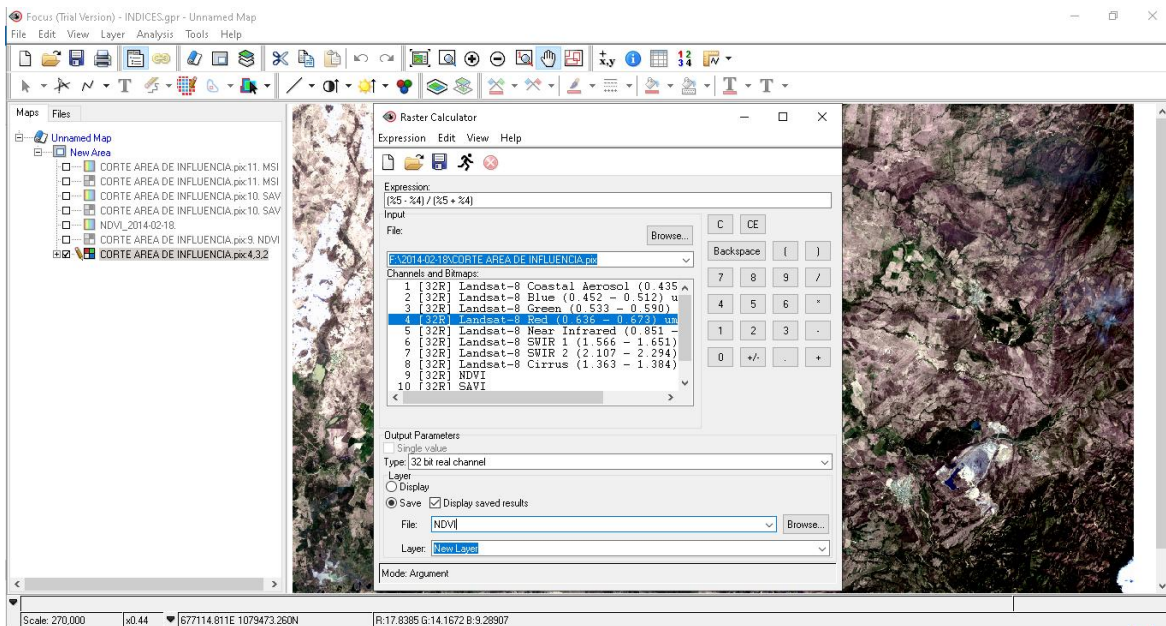
ANEXO A. Región escogida como la zona de estudio en la pagina de base de datos Geologica de los Estados Unidos (USGS) para su busqueda y posterior descarga.



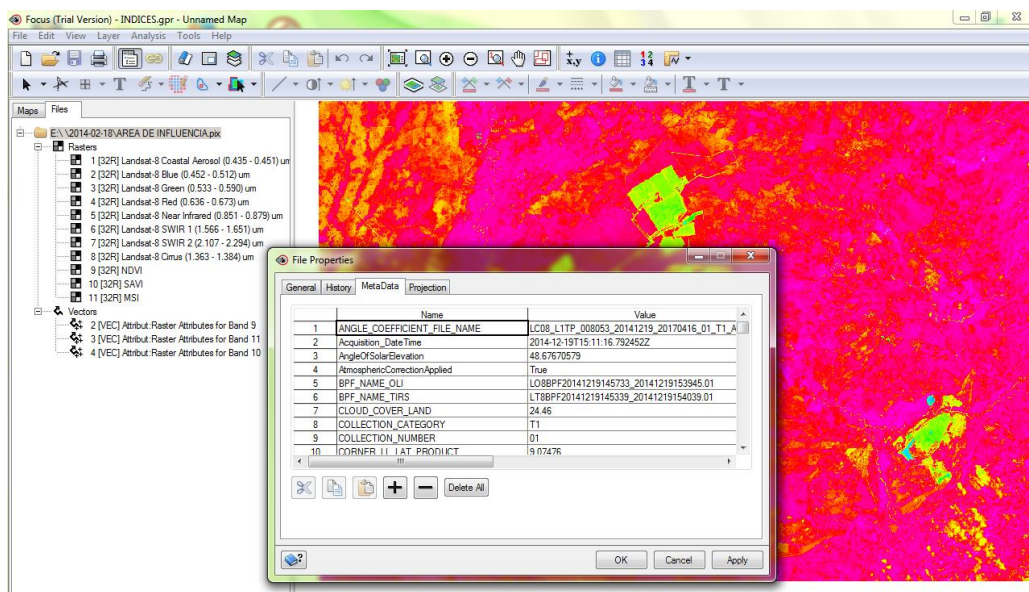
ANEXO B. Correccion atmosferica realizada al raster en el programa PCI Geomatic



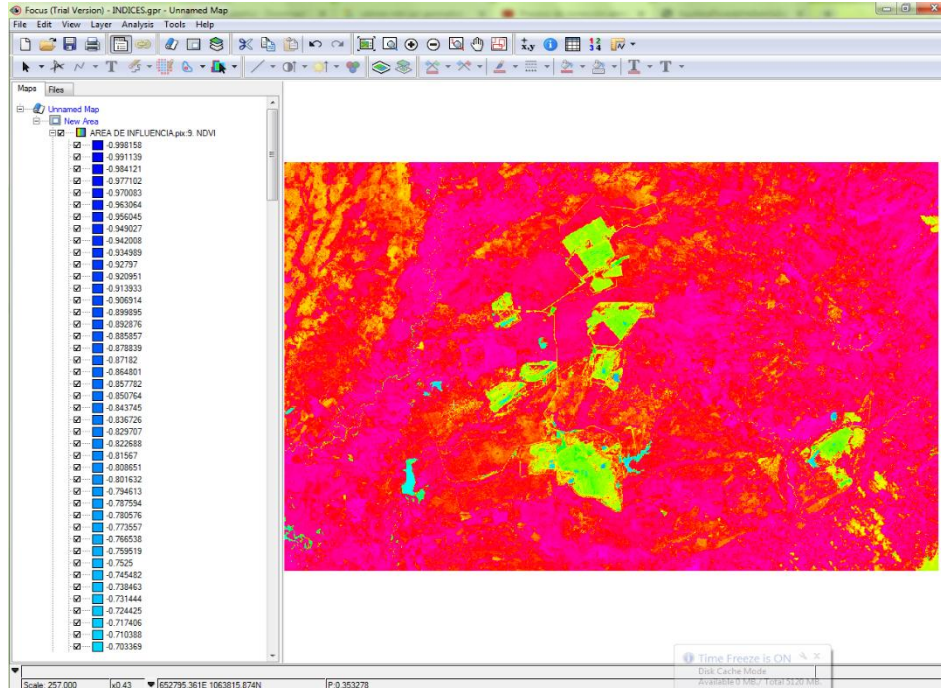
ANEXO C. Cálculo del NDVI de una imagen satelital en la calculadora ráster del programa PCI Geomatic.



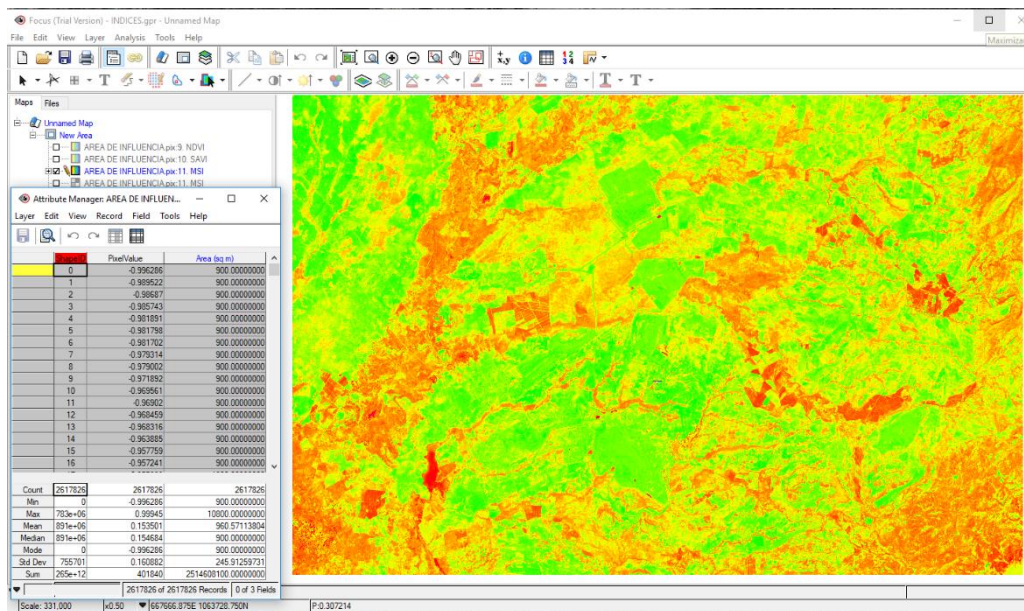
ANEXO D. Propiedades del archivo (MetaData) del raster procesado en PCI Geomatic.



ANEXO E. Valores de cada pixel del raster del Índice NDVI en Pci Geomatic.



ANEXO F. tabla de atributos con los valores del índice MSI 2017 en PCI Geomatic.



ANEXO G. Cálculo de NDVI al corregimiento de Becerril 1989 en el programa PCI Geomatic.

