

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**



**“Evaluación del estrés hídrico en caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.)
durante la sequía de los años 2014 y 2015 en el corredor seco de los
departamentos de Usulután y San Miguel, El Salvador.”**

POR:

JOSUÉ OMAR AYALA GIRÓN

Ciudad Universitaria, enero 2022

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**



**“Evaluación del estrés hídrico en caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.)
durante la sequía de los años 2014 y 2015 en el corredor seco de los
departamentos de Usulután y San Miguel, El Salvador.”**

POR:

JOSUÉ OMAR AYALA GIRÓN

Ciudad Universitaria, enero 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE



**“Evaluación del estrés hídrico en caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.)
durante la sequía de los años 2014 y 2015 en el corredor seco de los
departamentos de Usulután y San Miguel, El Salvador.”**

POR:

JOSUÉ OMAR AYALA GIRÓN

**REQUISITO PARA OPTAR AL GRADO DE:
INGENIERO AGRÓNOMO**

Ciudad Universitaria, enero 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M. SC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

DECANO:

PH. D. FRANCISCO LARA ASCENCIO

SECRETARIO:

ING. AGR. BALMORE MARTÍNEZ SIERRA

**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE**

ING. AGR. M. SC. JOSÉ MAURICIO TEJADA ASENCIO

DOCENTES DIRECTORES

ING. M. SC. PH. D. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

ING. AGR. M. SC. JOSÉ MAURICIO TEJADA ASENCIO

COORDINADOR GENERAL DE PROCESOS DE GRADUACIÓN

ING. AGR. M. SC. NELSON BERNABÉ GRANADOS ALVARADO

RESUMEN

El estudio de investigación se realizó en los municipios de Jiquilisco, Puerto El Triunfo, San Dionisio, Concepción Batres del departamento de Usulután y los municipios de San Jorge, San Rafael, El Tránsito y San Miguel del departamento de San Miguel reconocidos por dedicarse al cultivo de caña de azúcar en la zona oriental de El Salvador, entre las coordenadas de 13°10.14' y 13°37.68' latitud Norte y 88°03.18' y 88°44.58' longitud Oeste. Consistió en evaluar el estrés hídrico de las plantas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) durante la sequía de los años 2014 y 2015; a partir de imágenes satelitales LANDSAT 8, procesándolas mediante QGIS 3.10 y ArcGis 10.7.1. A través de la teledetección espacial con lo cual se determinó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la Temperatura a la Superficie de la Tierra (LST) obteniendo con su relación el Índice de Temperatura y Sequedad de la Vegetación (TVDI). Durante el estudio se determinó que los valores promedios de sequedad se comportan inversamente proporcional a la precipitación acumulada, la cual durante los años del 2012 al 2016 tuvo un ligero déficit de 272.20 mm en la zona oriental del país; así mismo se evaluó que las plantas de caña de azúcar cultivadas en las cercanías de los cuerpos de agua sufren menor afectación por estrés hídrico y los suelos más susceptibles al estrés hídricos fueron los Andisoles, Litosoles, Latosoles Arcillo Rojizos y los Grumosoles; el TVDI se comportó de forma inversamente proporcional a la precipitación acumulada, se determinó que los municipios en estudio más afectados fueron Concepción Batres, San Dionisio y Jiquilisco del departamento de Usulután y de San miguel fueron San Miguel, Moncagua y El Tránsito.

Palabras Claves: Estrés Hídrico, Caña de Azúcar, Teledetección Espacial, Índice de Temperatura y Sequedad de la Vegetación y Sequía.

SUMMARY

The research study was conducted in the municipalities of Jiquilisco, Puerto El Triunfo, San Dionisio, and Concepción Batres within the department of Usulután and the municipalities of San Jorge, San Rafael, El Tránsito and San Miguel within the department of San Miguel, all of them, recognized as a sugarcane crop zone in the eastern area of El Salvador, located between the coordinates 13°10.14' and 13°37.68' latitude North and 88°03.18' and 88°44.58' length West. The study consisted in evaluating the water stress of sugarcane plants (*Saccharum officinarum* L.) during the drought of 2014 and 2015; according to the LANDSAT 8 satellite images, all being processed using QGIS 3.10 and ArcGis 10.7.1. Through space remote sensing with which the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was determined and the Land Surface Temperature (LST) were determined, obtaining with their relationship the Vegetation Temperature and Dryness Index (TVDI). Throughout the study, it was determined that the average dryness values behave inversely proportional to the accumulated precipitation, which during the years 2012 through 2016 had a slight deficit of 272. 20 mm in the eastern part of the country; furthermore, it was evaluated that sugarcane plants that are grown near water bodies suffer less impact of water stress and the soils that are more likely to be affected by water stress were the Andisols, Lithosols, Red Clay Latosols and Grumosols; the TVDI behaved inversely proportional to the accumulated precipitation. It was determined that the most affected municipalities within the study were Concepción Batres, San Dionisio and Jiquilisco from the department of Usulután, and San Miguel, Moncagua and El Tránsito from the department of San Miguel.

Key words: Water Stress, Sugarcane, Spatial Remote Sensing, Temperature Index and Vegetation Dryness and Drought.

AGRADECIMIENTOS

A Dios todo poderoso por permitirme culminar mi carrera, por brindarme sabiduría a lo largo de mi vida y por demostrarme que no abandona a nadie por difíciles que parezcan las situaciones de la vida.

A mis padres María Teresa De Ayala y José Leónidas Ayala por guiarme con sus consejos y apoyo incondicional durante toda mi vida, por sus esfuerzos en el mercado aguantando sol, tormentas e incluso hambre los días malos.

A mis hermanos Lenin, Saraí y Naason por sus motivaciones y sus deseos de que pudiera culminar mi proceso estudiantil.

A los asesores de mi proyecto de investigación al Ing. M. Sc. Ph. D. Miguel Hernández y al Ing. Agr. M. Sc. José Tejada; por su tiempo y dedicación durante todo el proceso de asesoría, ya que sin sus conocimientos no se podría haber llevado a cabo esta investigación.

Al Ph. D. Raúl Rivas investigador de la comisión de investigaciones científicas del Instituto de Hidrología de las Llanuras, de Argentina; Por sus asesorías virtuales para estimar el TVDI, con base a su experiencia en dicha temática.

A mi jefa la Inga. Jenniffer Aguilar, por su constante apoyo, motivaciones, consejos y su amistad, así como por su comprensión de mis procesos durante esta investigación.

A todos mis compañeros de trabajo en Cruz Roja Salvadoreña.

Al Ing. Agr. Rene Aparicio por sus consejos a lo largo de nuestra amistad, por brindar su confianza en mí y por guiarme con sus enseñanzas.

ÍNDICE GENERAL

	Pag.
Contenido	
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE CUADROS	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. Corredor Seco Centroamericano	2
2.2. El Niño Oscilación del Sur	2
2.3. Estrés hídrico o sequía	3
2.3.1 Características de la sequía	4
2.3.2. Tipos de sequías	5
2.3.3. La sequía y su impacto	6
2.3.4. Causas y efectos de la sequía	7
2.4. El Cultivo de Caña de Azúcar	7
2.4.1. Clasificación Taxonómica	8
2.5. Ecología del cultivo de Caña de Azúcar	8
2.5.1. Clima	9
2.5.2. Temperatura	9
2.5.3. Luminosidad	9
2.5.4. Precipitación	10
2.5.5. Edafología	10
2.6. Fenología del cultivo	10

2.7. Pedología de la zona estudiada	11
2.7.1. Aluviales	11
2.7.2. Regosoles	12
2.7.3. Halomórficos	12
2.7.4. Grumosoles	12
2.7.5. Latosoles arcilloso rojizo	12
2.7.6. Andisoles	12
2.7.7. Litosoles	13
2.8. La teledetección espacial	13
2.8.1. Ventajas de la teledetección	14
2.8.2. Elementos de la teledetección	14
2.9. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	15
2.9.1 Los valores de NDVI y su significado en las plantas.	16
2.10. Índice de Temperatura y Sequedad de la Vegetación (TVDI)	17
2.10.1. Determinación del TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index)	17
3. MATERIALES Y MÉTODOS	20
3.1 Descripción de la zona de estudio	20
3.2 Tipo de Estudio	20
3.3 Metodología de laboratorio	20
3.4 Análisis geográfico de la zona de estudio.	21
3.5 Determinación de TVDI	22
3.5.1. Obtención de imágenes satelitales LANDSAT8 y sus metadatos.	22
3.5.2. Determinación de la radiancia de la temperatura de brillo (TB)	23
3.5.3. Determinación de la temperatura de brillo (T)	24
3.5.4. Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	24

3.5.5. Cálculo de proporción de la vegetación (PV)	25
3.5.6. Cálculo de la Emisividad de la Superficie de la Tierra (LSE) a partir del NDVI	25
3.5.7. Cálculo de la Temperatura de la Superficie de la Tierra (LST)	26
3.5.8. Cálculo del índice de Temperatura y Sequedad de la Vegetación (TVDI)	27
3.5.9. Grafica del comportamiento de TVDI durante los años en estudio	29
3.6 Variables relacionadas al TVDI.	29
3.6.1. Los tipos de suelos y municipios relacionados al Índice de Temperatura y Sequedad de la Vegetación (TVDI).	29
3.7 Datos Climatológicos de los años 2010 al 2019.	30
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1 El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	33
4.1.1 Comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) durante el año 2014	33
4.1.2 El comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) durante el año 2015	34
4.2 La Temperatura a la Superficie de la Tierra	36
4.2.1 El comportamiento de la Temperatura a la Superficie de la Tierra (LST) durante los años 2014 y 2015	36
4.3 Índice de Temperatura y Sequedad de la Vegetación (TVDI).	37
4.3.1 El comportamiento de la Temperatura y Sequedad de la Vegetación durante los años 2014 y 2015	37
4.4. TVDI con su relación a la pedología y su efecto en los municipios de la zona en estudio para el año 2014	38
4.4.1. Imágenes satelitales capturada el 23 de enero del 2014	38
4.4.2. Imágenes satelitales capturada el 13 de abril del 2014.	40

4.4.3. Imágenes satelitales capturada el 18 de julio del 2014	42
4.5. Imágenes satelitales de TVDI con su relación a la pedología y su efecto en los municipios de la zona en estudio para el año 2015	46
4.5.1. Imágenes satelitales capturada el 10 de enero del 2015	46
4.5.2. Imágenes satelitales capturada el 31 de marzo del 2015	48
4.5.3. Imágenes satelitales capturada el 06 de agosto del 2015	50
4.5.4. Imágenes satelitales capturada el 26 de noviembre del 2015.	52
4.6. Historial climático de la Zona en Estudio	55
4.6.1. Precipitación en la zona de estudio desde el año 2010 hasta el 2019	55
4.6.2. Temperatura en la zona de estudio desde el año 2010 hasta el 2019	56
4.7. Comportamiento del TVDI en relación con los datos climáticos de la zona en estudio	57
4.7.1. Comportamiento del TVDI con la Precipitación de los años 2014 y 2015	57
4.7.2. Comportamiento del TVDI con la Temperatura de los años 2014 y 2015	58
5. CONCLUSIONES	59
6. RECOMENDACIONES	60
7. BIBLIOGRAFÍA	61
8. ANEXOS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Pag.
Figura 1. Relación física entre la tensión y la deformación (stress-strain).....	3
Figura 2. Fases fenológicas de la caña de azúcar.....	11
Figura 3. Elementos de la teledetección.....	15

Figura 4. Valores de NDVI en plantas.....	17
Figura 5. Descripción del TVDI.....	18
Figura 6. Zonas productoras de Caña, Republica de El Salvador.	20
Figura 7. Formula aplicada de TB en el calculador ráster.	23
Figura 8. Formula aplicada de temperatura de brillo (T).....	24
Figura 9. Aplicación de la fórmula para NDVI.....	25
Figura 10. Aplicación de fórmula para PV.	25
Figura 11. Aplicación de la fórmula para LSE.....	26
Figura 12. Aplicación de la fórmula para el LST.....	27
Figura 13. Aplicación de fórmula para TVDI.	28
Figura 14. Capa de municipios en Zonal Statistic.	30
Figura 15. Capa de tipos de suelos en Zonal Statistic.	30
Figura 16. Ubicación geográfica de El Salvador.	31
Figura 17. Ubicación geográfica de la zona de estudio.	31
Figura 18. Descarga de datos climáticos.....	32
Figura 19. Mapa de TVDI, 23 de enero del 2014.	38
Figura 20. TVDI y su relación con la pedología, 23 de enero del 2014.....	39
Figura 21. TVDI y su relación con los municipios, 23 de enero del 2014.	39
Figura 22. Mapa de TVDI, 13 de abril del 2014.....	40
Figura 23. TVDI y su relación con la pedología, 13 de abril del 2014.	41
Figura 24. TVDI y su relación con los municipios, 13 de abril del 2014.	41
Figura 25. Mapa de TVDI, 18 de julio del 2014.	42
Figura 26. TVDI y su relación con la pedología, 18 de julio del 2014.	43
Figura 27. TVDI y su relación con los municipios, 18 de julio del 2014.....	43
Figura 28. Mapa de TVDI, 23 de noviembre del 2014.....	44
Figura 29. TVDI y su relación con la pedología, 23 de noviembre del 2014.	45
Figura 30. TVDI y su relación con los municipios, 23 de noviembre del 2014.	45
Figura 31. Mapa de TVDI, 10 de enero del 2015.	46
Figura 32. TVDI y su relación con los municipios, 10 de enero del 2015.	47
Figura 33. TVDI y su relación con la pedología, 10 de enero del 2015.....	47
Figura 34. Mapa de TVDI, 31 de marzo del 2015.	48

Figura 35. TVDI y su relación con la pedología. 31 de marzo del 2015.....	49
Figura 36. TVDI y su relación con los municipios, 31 de marzo del 2015.....	49
Figura 37. Mapa de TVDI, 06 de agosto del 2015.	50
Figura 38. TVDI y su relación con los municipios, 06 de agosto del 2015.....	51
Figura 39. TVDI y su relación con la pedología, 06 de agosto del 2015.....	51
Figura 40. Mapa de TVDI, 26 de noviembre del 2015.....	52
Figura 41. TVDI y su relación con la pedología, 26 de noviembre del 2015.	53
Figura 42. TVDI y su relación con los municipios, 26 de noviembre del 2015.....	53

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Información recopilada y su fuente.....	21
Cuadro 2. Metadatos de imágenes tipo LANDSAT 8.	23
Cuadro 3. Valores promedios de NDVI en las imágenes tipo LANDSAT 8 del año 2014. 33	
Cuadro 4. Valores de NDVI en las imágenes satelitales tipo LANDSAT 8, del año 2015. 34	

ÍNDICE DE ANEXOS

Cuadros en anexos

Cuadro A 1. Valores promedios de LST; año 2014.....	67
Cuadro A 2. Valores promedios de LST; año 2015.....	67
Cuadro A 3. Valores promedios del TVDI; año 2014.....	67
Cuadro A 4. Valores promedios del TVDI; año 2015.....	68
Cuadro A 5. Historial de precipitación acumulada de la zona en estudio durante los años del 2010 al 2019.	69
Cuadro A 6. Datos de temperatura de la zona en estudio de los años del 2010 al 2019.	69

Figuras en anexos

Figura A 1. Complementos de la imagen satelital del 23 de enero del 2014.	68
Figura A 2. Complementos de la imagen satelital del 24 de febrero del 2014.	69
Figura A 3. Complementos de la imagen satelital del 28 de marzo del 2014.	69
Figura A 4. Complementos de la imagen satelital del 13 de abril del 2014.	69
Figura A 5. Complementos de la imagen satelital del 02 de julio del 2014.	69
Figura A 6. Complementos de la imagen satelital del 18 de julio del 2014.	69
Figura A 7. Complementos de la imagen satelital del 06 de octubre del 2014.	69
Figura A 8. Complementos de la imagen satelital del 07 de noviembre del 2014.	69
Figura A 9. Complementos de la imagen satelital del 23 de noviembre del 2014.	69
Figura A 10. Complementos de la imagen satelital del 25 de diciembre del 2014.	69
Figura A 11. Complementos de la imagen satelital del 10 de enero del 2015.	69
Figura A 12. Complementos de la imagen satelital del 15 de marzo del 2015.	69
Figura A 13. Complementos de la imagen satelital del 31 de marzo del 2015.	69
Figura A 14. Complementos de la imagen satelital del 02 de mayo del 2015.	69
Figura A 15. Complementos de la imagen satelital del 18 de mayo del 2015.	69
Figura A 16. Complementos de la imagen satelital del 06 de agosto del 2015.	69
Figura A 17. Complementos de la imagen satelital del 09 de octubre del 2015.	69
Figura A 18. Complementos de la imagen satelital del 26 de noviembre del 2015.	69
Figura A 19. Complementos de la imagen satelital del 12 de diciembre del 2015.	69
Figura A 20. Complementos de la imagen satelital del 28 de diciembre del 2015.	69

1. INTRODUCCIÓN

América Central ha sido históricamente afectada por eventos hidrometeorológicos extremos, la sequía es uno de los fenómenos que más ha generado pérdidas en el sector agropecuario. Esta problemática es perceptible en el Corredor Seco Centroamericano (Calvo Solano *et al.* 2018). De acuerdo a la FAO (2016), los fenómenos meteorológicos extremos en Centroamérica amenazan a la agricultura, la seguridad alimentaria y nutricional, debido a su ubicación geográfica.

La vegetación es un indicador para la evaluación de procesos biofísicos en los ecosistemas, como los fenómenos relacionados a la pérdida de biodiversidad, desertificación, relación entre la vegetación y erosión del suelo e interacción vegetación-clima (Aguilar 2015). Se utilizan sensores remotos para el análisis de los sistemas de información geográfica de variables hidrológicas de interés en las industrias de cultivos y ambientales siendo un ejemplo de ello la estimación de evaporación y transpiración, el porcentaje de material vegetal y las condiciones de los cultivos (Rivas *et al.* 2005).

Es por ello que el trabajo de investigación está encaminado a prevenir los impactos ocasionados por sequías extremas en el cultivo de caña de azúcar, a través del análisis espacio-temporal del estrés hídrico, estimando lo mediante sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica basado en QGIS 3.10 y ArcGIS 10.7.1. calculando la temperatura en la superficie del suelo a partir de la emisividad de la superficie de la tierra y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), derivado imágenes satelitales tipo LANDSAT 8 con corrección atmosférica utilizando el método de Sustracción de Objetos Oscuros (DOS). Para estimar el índice de temperatura y sequedad de la vegetación (TVDI) se utilizó la ecuación propuesta por Sandholt *et al.* (2002).

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Corredor Seco Centroamericano

Meyrat *et al.* (2012), describe el Corredor Seco Centroamericano como un grupo de ecosistemas que se combinan en la ecorregión del bosque tropical seco de Centroamérica, que inicia en Chiapas, México; y, en una franja, abarca las zonas bajas de la vertiente del Pacífico y gran parte de la región central premontana (0 a 800 msnm) de Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y parte de Costa Rica (hasta Guanacaste); en Honduras, además, incluye fragmentos que se aproximan a la costa Caribe.

De acuerdo con Mikkelsen *et al.* (2014), el concepto de corredor se refiere a un espacio caracterizado por la presencia de un eje longitudinal en el cual convergen una serie de elementos físicos y sociales que permiten establecer conexiones entre sí. En el caso del CSC, este eje longitudinal lo constituye la llanura costera que discurre a través de la vertiente pacífica centroamericana, en la cual están presentes una serie de factores climáticos (existencia de una estación seca) y biogeográficos (bosque tropical seco y sabanas) que le confieren unidad a este territorio.

2.2. El Niño Oscilación del Sur

El niño es la corriente marina tibia, con dirección suroeste, que aparece anualmente durante el verano del hemisferio sur, después de la navidad y es por ello su nombre (Niño Jesús). El niño de América del Sur es parte de un conjunto de interrelaciones entre los cambios del tiempo y las condiciones oceánicas, en mayor escala afectando aproximadamente a la mitad del planeta, denominándose científicamente como la Oscilación Sur (Fernández y Ramírez 1991).

Alfaro y Amador (1996), describen que la Oscilación del Sur es un fenómeno de escala planetaria que abarca toda la tierra en su dimensión espacial y de forma temporal sobrepasa los límites estacionales. Bajo estos efectos las temperaturas superficiales del mar son relativamente altas, los vientos alisios son débiles y las diferencias de presión a lo largo del Pacífico Tropical son pequeñas.

Sus efectos dependen de la localización y estación del año; afectando mayormente a la temperatura entre los trópicos, aumentando o disminuyendo la frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales (Medina 2010). De diciembre a febrero los efectos de EL NIÑO se observan en gran parte del mundo (Sur de África, Este de Asia, Norte, centro y Sur de América).

2.3. Estrés hídrico o sequía

La planta al estar sometida a condiciones significativamente diferentes a sus requerimientos óptimos de agua para su vida natural se dice que está sometida a estrés hídrico (Valladares *et al.* 2004). desde el punto de vista ecofisiológico, se ha definido al estrés hídrico como cualquier limitación al funcionamiento de una planta, impuesta por una disponibilidad de agua insuficiente (Medrano y Flexas 2003). Desde un punto de vista fisiológico la palabra estrés remite a algún tipo de sufrimiento, como una alteración del funcionamiento normal con consecuencias sobre el crecimiento o el desarrollo de la planta (Salisbury y Ross, 2000).

La falta de disponibilidad hídrica, que causa el estrés, puede deberse a un déficit hídrico edáfico o a una demanda evaporativa atmosférica excesiva, o a la interacción de ambos factores, aspecto, este último, que se enmarca en lo que se conoce simplemente como déficit hídrico (Vila 2011). Siendo un factor ambiental capaz de producir una deformación (*strain*) (figura 2) potencialmente dañina para la planta, la deformación o *strain* sería la extensión o compresión -respuesta al estrés- resultante de una tensión o estrés determinado al que está sometido una planta (Valladares *et al.* 2004).

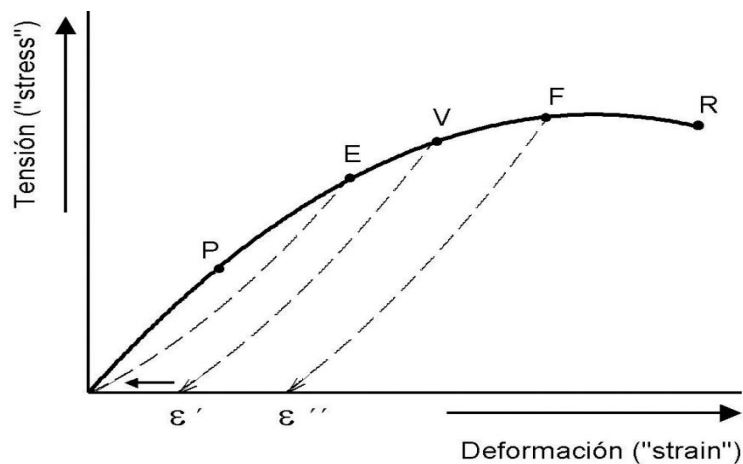


Figura 1. Relación física entre la tensión y la deformación (stress-strain).

Fuente: Valladares *et al.* 2004.

Donde:

P: fase de respuesta proporcional entre la tensión y la deformación.

E: límite de elasticidad del material.

V: límite de la deformación elástica ("elastic strain", ϵ').

F: límite de la deformación plástica ("plastic strain", ϵ'').

R: límite de resistencia del material.

Según Varela (2010), la sequía desde el punto de vista biológico y ecofisiológico de las plantas, como el conjunto de circunstancias en las que las plantas sufren una reducción del crecimiento y producción por causa del insuficiente recurso hídrico. A pesar de que aparentemente hay suficiente agua en el suelo, el déficit hídrico es demasiado elevado (la demanda evaporativa es muy alta y supera la capacidad de la planta de aprovisionar agua en las hojas) o bien el agua no está físicamente disponible (ejemplo de ello, es cuando el agua es retenida por sales o partículas finas del suelo).

La sequía es un fenómeno de ausencia de lluvias y de falta de humedad en el ambiente y en los suelos, inclusive con la capacidad de llegar a agotar las capas freáticas del subsuelo, repercutiendo en los ríos y pozos (García de Pedraza 1982).

La sequía es uno de los fenómenos naturales más complejos, menos entendidos, que afecta a más personas, tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y espacio, sus efectos son acumulativos y pueden permanecer aún después de la culminación del evento (Núñez-López *et al.* 2007).

2.3.1 Características de la sequía

Escalante y Reyes (1998), Investigaron que para el análisis de las características se tienen un conjunto de índices, como los índices propuestos de Lang, Martonne, Thornthwaite, Prescott, capot-Rey, Moral y Palmer.

Valiente (2001), detalla los elementos numéricos, para poder precisar las características de los eventos secos. Se definen siete parámetros de los cuales, uno es independiente (magnitud), cuatro al componente temporal (duración, frecuencia, velocidad de implantación y espaciamiento temporal) y dos al espacial (extensión y dispersión espacial), los cuales están detallados a continuación:

1. **La magnitud:** es el déficit medio de precipitación o caudal durante el periodo del evento seco. Puede ser medido como la anomalía (en porcentaje) o la diferencia (valor Absoluto) de precipitación o caudal para el periodo seleccionado, así mismo se puede delimitar la severidad de la sequía.
2. **La duración:** es el tiempo (número de días, meses o años consecutivos) durante el cual la precipitación o el caudal, son inferiores a la precipitación o el caudal medio de

ese mismo periodo, y este puede estar relacionado de la siguiente forma. $MAGNITUD = SEVERIDAD / DURACIÓN$.

3. **La frecuencia:** es el número de casos que se producen durante un periodo determinado. Inclusive puede medirse a través de la probabilidad empírica de que la precipitación o el caudal sean inferiores a la media, o del periodo de retorno del evento seco (intervalo medio de tiempo dentro del que puede esperarse que ocurra una sequía de determinada magnitud).
4. **La velocidad de implantación:** este es el tiempo transcurrido entre el momento de inicio del déficit de precipitación o caudal y el momento en el que ese déficit alcanza su valor máximo.
5. **El espaciamiento temporal:** es el tiempo transcurrido entre diversos periodos secos, lo que nos proporciona una medida de regularidad o aleatoriedad del fenómeno.
6. **La extensión:** es el área superficial total en la que se registra el déficit hídrico.
7. **La dispersión espacial:** es la medida del grado de difusión o concentración de la anomalía de caudal o de precipitaciones.

2.3.2. Tipos de sequías

Debido a que no existe una definición únicamente admitida para el concepto de sequía, se explica por los distintos tipos de sequías que pueden producirse, dependiendo de la variable que se considere como referencia (Monreal 2006). los tipos de sequías son:

Sequía meteorológica.

Es el intervalo de tiempo en meses y años, durante el cual el aporte de humedad en un lugar determinado cae consistentemente por debajo de lo climatológicamente esperado o del aporte de humedad climática esperada (Valiente 2001). Así mismo Coronel (2013), expresa que es una expresión de la desviación de la precipitación respecto a la media durante un periodo de tiempo determinado.

Sequía Agrícola.

Ortega Gaucin (2012), define la sequía agrícola como la baja disponibilidad de agua en los suelos para el sostenimiento de los cultivos y para el crecimiento de las especies forrajeras, siendo esta ocasionada por un déficit marcado y permanente de lluvia, lo cual reduce la

producción agrícola en comparación con los valores normales de precipitación en una región determinada.

Sequía hidrológica.

Lacruz (2012), describe que es el periodo en el cual los recursos hídricos superficiales y sub-superficiales son insuficientes para satisfacer la demanda hídrica de un determinado sistema o cuenca hidrográfica; este tipo de sequía puede tardar un poco en comparación con las sequías meteorológicas y agrícolas, inclusive pueden durar más, aunque la sequía meteorológica haya terminado.

Sequía socioeconómica.

Es la sequía que se encuentra relacionada con los niveles de pérdida de ingresos y productividad en aquellas actividades cuyo insumo sea el vital líquido. Siendo afectada directamente por el grado de dependencia del recurso en el tiempo y el volumen del mismo, así mismo de la necesidad básica a satisfacer y en la importancia como insumo en procesos productivos (Velasco *et al.* 2005).

2.3.3. La sequía y su impacto

Desde el punto de vista de la asistencia humanitaria la sequía es una de las responsables de desencadenar numerosas crisis humanitarias y desastres con impactos en los sectores sociales, económicos, ambientales y productivos (Mansilla 2010). Entre los años 2013 y 2014, la disminución de las precipitaciones tuvo efectos adversos sobre el sector agropecuario en América Central disminuyendo la productividad de los cultivos en las familias rurales (Calvo Solano *et al.* 2018).

Según la FAO (2016), la sequía en América Central ha provocado una situación de crisis, que se refleja en los indicadores sanitarios de los grupos en riesgo de la población centroamericana. Dentro de estos, sobresalen habitantes de zonas rurales y comunidades indígenas, cuyo medio de subsistencia y fuente principal de ingresos económicos es la actividad agrícola, y en la mayoría de los casos las cosechas son insuficientes para satisfacer sus necesidades alimentarias

Otros de los impactos son la degradación y disminución de la capacidad productiva de las tierras áridas, semiárida y subhúmedas secas, aunque la mayor parte de la degradación de la tierra se debe al uso inadecuado de las mismas (Beekman 2005).

2.3.4. Causas y efectos de la sequía

Según Ortega Gaucin (2013) las causas de la sequía se pueden agrupar en dos grandes categorías:

Las de origen natural: son aquellas provocadas por la modificación en los patrones de la circulación atmosférica, las variaciones en la actividad solar y los fenómenos de interacción entre el océano y la atmósfera como lo es El Niño - Oscilación del Sur (ENOS).

Las de origen antropogénico: son aquellos daños provocados por el hombre, como la quema de combustibles fósiles, la degradación ambiental (deforestación, degradación del suelo y desertificación) así como la alteración de los sistemas ecológicos naturales.

Según USAID (2017), Los efectos de la sequía pueden ser agrupados de la siguiente forma:

- a) En los Recursos hídricos: afecta en la reducción del agua de superficie, disminución de las tasas de recarga de aguas subterráneas y la disminución de las escorrentías fluviales.
- b) En la agricultura: disminución en la producción agrícola y bajo desarrollo de los animales.
- c) En los ecosistemas: es el efecto de pérdida en la biodiversidad y la degradación de las zonas costeras, los bosques húmedos y fríos.
- d) En la Salud Humana: deshidratación por estrés calórico, enfermedad renal crónica, enfermedades respiratorias.
- e) En la infraestructura y energía: las tendencias de la sequía ponen en peligro la producción hidroeléctrica de las empresas.

2.4. El Cultivo de Caña de Azúcar

La caña de azúcar es una planta tropical, la cual pertenece a la familia de las gramíneas y es de la tribu Andropogoneae; actualmente se cultiva un híbrido muy complejo de entre dos o más especies del género *Saccharum*. Estas sufrieron cruzamiento natural, originan un género muy diverso. Es por ello que este cultivo se adapta a una amplia gama de condiciones ambientales y climática (Lagos 1986, Díaz-Ayala *et al.* 2004).

Tuvo su origen en Nueva Guinea hace 8,000 años y se expandió a Asia. En 1492 los europeos habían desarrollado gusto por el dulce y Cristóbal Colón llevó caña consigo al continente americano. Con el paso de los años los campesinos han aumentado las parcelas dedicadas al cultivo de caña de azúcar (Hughes *et al.* 2016).

2.4.1. Clasificación Taxonómica

Según Lagos (1986), la Caña de Azúcar tiene la siguiente Clasificación Taxonómica:

Nombre Común: Caña

Nombre Científico: *Saccharum officinarum* L.

Clase: Monocotiledónea

Orden: Glumifloras

Familia: Gramíneas

Género: *Saccharum*

Especie: *Officinarum*

2.5. Ecología del cultivo de Caña de Azúcar

Para que la caña de azúcar se desarrolle óptimamente necesita temperaturas que oscilan entre los 25 y 28 °C y una mínima de 20 °C, aunque esto podría variar según la variedad y el manejo del cultivo (Ingenio La Cabaña 1999). Cuando las temperaturas de la noche y del día son uniformes, la caña no cesa de crecer y en sus tejidos siempre habrá alto porcentaje de azúcares reductores. Así mismo a mayor radiación solar habrá mayor actividad fotosintética y mayor translocación de carbohidratos de las hojas al tallo (Díaz Montejo y Portocarrero Rivera 2002).

Durante su desarrollo vegetativo, la caña es indispensable abastecerla adecuadamente de agua, para que este pueda realizar la absorción, transporte y asimilación de los nutrientes. El requerimiento total de agua es de 1500 a 2000 mm por año (CAMAGRO 2016).

CONADESUCA (2015), menciona que entre el 50% y 70% de las raíces se distribuyen en los primeros 30 cm de profundidad, por lo que es la zona donde existe mayor intensidad de absorción (de agua y nutrientes). También indica que este cultivo se adapta a distintos tipos de topografía, ya sean estas planas o pronunciadas.

2.5.1. Clima

El factor clima es de mucha importancia para el desarrollo adecuado del cultivo, ya que las lluvias y la temperatura normales implícitamente favorecen las cosechas, mientras que las condiciones con cambios bruscos en el clima tienden a reducir el buen rendimiento. Un ejemplo de ello es la humedad deficiente, ya que esta puede dañar considerablemente el desarrollo de la planta, otro ejemplo es cuando la lluvia se prolonga, esta puede retrasar la cosecha o reducir la producción (Díaz Ayala *et al.* 2004).

2.5.2. Temperatura

Duarte Álvarez y González Villalba (2019), afirman que la temperatura es el principal determinante climático del cultivo de caña de azúcar, necesitando diferentes temperaturas, durante las siguientes etapas fenológicas:

- a) Germinación y desarrollo radicular: la temperatura óptima para la germinación y el desarrollo radicular va de 26 a 33°C.
- b) El Crecimiento: la temperatura óptima para el crecimiento de la caña de azúcar es de los 30-34 °C. Por debajo de los 15 y arriba de los 38 °C paraliza su crecimiento.
- c) Maduración: las temperaturas bajas en la caña de azúcar aumentan la producción y almacenaje de sacarosa, y su crecimiento es reducido.

2.5.3. Luminosidad

La caña pertenece a las plantas tipo C₄, ya que poseen anatomía tipo Kranz, estas plantas poseen dos tipos de cloroplastos, los localizados en las células del mesófilo y los de las células de la vaina vascular, con los cuales la planta es capaz de fijar CO₂. Es por ello que tienen una mayor eficiencia fotosintética y utilización de la energía solar, puesto que su tasa fotosintética aumenta con la luminosidad, hasta alcanzar valores superiores a 60 lux (lumen /m²) (600 w/m²) de intensidad, con una variación entre 6,5 a 150 lux (65 a 1500 w/m²), en función de la variedad, lo que le confiere un elevado punto de saturación de luz (Aguilar Rivera 2009).

2.5.4. Precipitación

El cultivo de caña de azúcar necesita un régimen de precipitación de 1500 mm, es por ello que para producir una tonelada de caña (peso en fresco) se necesitan de 50 a 100 m³ de agua. Las lluvias intensas disminuyen significativamente la calidad del jugo, propicia mayor crecimiento vegetativo, aumenta la humedad en el tejido vegetal y dificulta las maniobras durante la cosecha (CONADESUCA 2015).

2.5.5. Edafología

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) se cultiva con éxito en la mayoría de los suelos; pero estos deben contener muy buena cantidad de materia orgánica y un buen drenaje externo e interno, y que su pH oscile entre 5.5 y 7.8 (Díaz-Ayala *et al.* 2004). Los suelos más adecuados son los de textura franca o franco arcillosos, bien drenados, profundos, aireados, topografía plana y semiplana (Morales 1991).

2.6. Fenología del cultivo

Según Romero *et al.* (2009), Las fases fenológicas de la caña de azúcar tienen la siguiente clasificación (Figura 3):

A. Fase de emergencia y establecimiento de la población inicial de tallos:

Generalmente se le denomina brotación, la emergencia sucesiva y el mantenimiento temporal (etapa de estabilización) de tallos primarios, caracterizados por mantener una altura mínima mientras incrementa el número de hojas verdes del tallo.

B. Fase de macollaje y cierre del cañaveral: esta fase es importante ya que

define el rendimiento, por que establece el número potencial de órganos cosechables. Como característica principal tiene que el aumento de la población total de tallos. El aumento de las dimensiones de las láminas foliares, provocan un aumento significativo del índice de área foliar (IAF), posibilitando de esta manera el cierre del cañaveral.

C. Fase de determinación del rendimiento cultural: comúnmente conocido como

el Gran Crecimiento. En esta fase se define la producción de caña al determinarse la cantidad de tallos molibles y en medida el peso fresco por tallo.

El ritmo intenso de crecimiento se sustenta en el significativo aumento que simultáneamente se registra en el número de hojas verdes por tallo, que alcanza su máximo valor (8- 12 hojas verdes/tallo) al término de esta fase.

D. Fase de maduración y definición de la producción: en esta fase se define el contenido final de la sacarosa en los tallos y la producción de azúcar por unidad de área, con una progresiva disminución del ritmo de elongación caulinar (el sistema caulinar está compuesto por rizomas y tallos) y el mantenimiento temporal de un área foliar fotosintéticamente activa, si bien su magnitud disminuye progresivamente asociada con la senescencia.

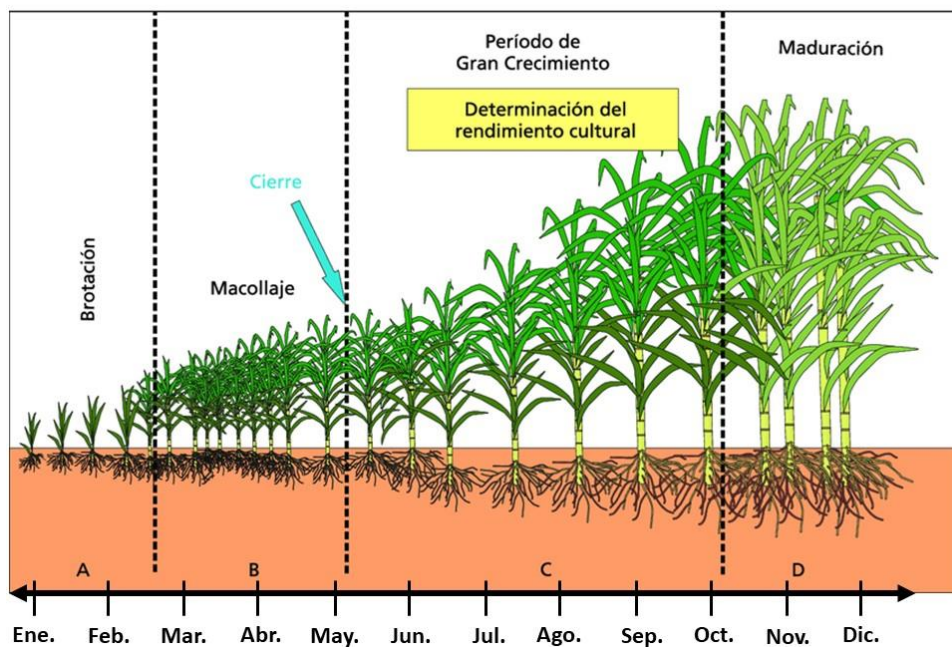


Figura 2. Fases fenológicas de la caña Fuente: Romero *et al.* 2009.

2.7. Pedología de la zona estudiada

2.7.1. Aluviales

Son los suelos de materiales transportados o depositados en planicies costeras y valles interiores, siendo de textura variable, son recientes o de reciente deposición y carecen de modificaciones de agentes externos como el clima y agua. Usualmente están ubicado donde el manto freático está cerca de la superficie y el drenaje por lo general es pobre. Son suelos de alta productividad permitiendo agricultura intensiva y mecanizada, aptos para toda clase de cultivos. Es factible el uso de riego (Rojas-Cáceres 2017).

2.7.2. Regosoles

Son suelos poco profundos, jóvenes de material suelto o no consolidado de textura muy ligera y condiciones de pedregosidad. El horizonte superficial, es único evidente a la vista, suele ser de unos 10 a 20 centímetros de espesor (Vivanco *et al.* 2010).

2.7.3. Halomórficos

Se caracterizan por ser suelos salinos de los manglares de colores grises debido a las condiciones anaeróbicas existentes durante su formación por permanecer inundados frecuentemente. Su textura es variable, es decir, de textura limosas, arenosas y arcillosas de estratos en diferente posición (Mieres *et al.* 2012).

2.7.4. Grumosoles

Son suelos arcillosos negros u oscuros los cuales se desarrollan bajo una gran variedad de e condiciones climáticas, pero usualmente con alternativa de estaciones húmedas y secas. Cuando están muy mojados son muy pegajosos y plásticos; cuando están secos son muy duros y se rajan (Sotelo *et al.* 2008). En la superficie son de color oscuro, pero con poco humus o materia orgánica. El subsuelo es gris oscuro. Son muy profundos poco permeables por lo que la infiltración de agua lluvia es muy lenta. Su uso potencial es de moderada a baja, no apta para cultivos permanentes de alto valor comercial porque al rajarse rompen las raíces de las plantas.

2.7.5. Latosoles arcilloso rojizo

Suelos arcillosos de color rojizo en lomas y montañas. Son bien desarrollados con estructura en forma de bloques con un color generalmente rojo, aunque algunas veces se encuentran amarillentos o cafésos. Esta coloración se debe principalmente a la presencia de minerales de hierro de distintos tipos y grados de oxidación. La textura superficial es franco arcilloso y el subsuelo arcilloso. La profundidad promedio es de un metro, aunque en algunos sitios se observa afloración de roca debido a los procesos de erosión. Son suelos aptos para casi todos los cultivos (Pabón de Lara 1998).

2.7.6. Andisoles

Suelos desarrollados sobre materiales piroclásticos depositados por erupciones volcánicas, con su principal característica es la variedad de material parental debido a la naturaleza de los materiales expulsados en las erupciones. Tienen por lo general un horizonte superficial entre 20 y 40 centímetros de espesor, de color oscuro, textura franca y estructura granular. El origen de estos suelos se debe al rápido enfriamiento de los materiales expulsados, que

no permite la cristalización de los minerales con un alto grado de ordenación, resultando así un material vítreo o vidrio volcánico amorfo (Moreno-Ramón *et al.* 2011).

2.7.7. Litosoles

Suelos de muy poca profundidad sobre roca pura, son suelos muy complejos. La mayoría son suelos cuyos horizontes superficiales han sido truncados a causa de una severa erosión laminar o sea que la erosión ocurre en laminas y no en forma de cárcavas, son suelos arcillosos como los latosoles pero muy superficiales. Las texturas varían de gruesa, arenas y gravas hasta muy pedregosos sobre la roca dura. El uso potencial es muy pobre de bajo rendimiento (Bautista *et al.* 2005).

2.8. La teledetección espacial

Se entiende por teledetección cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella, sin embargo, de una forma más restringida y en el ámbito de las ciencias de la Tierra, la teledetección tiene como finalidad la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales (Pérez y Muñoz 2006).

Bravo Morales (2017) menciona que, si la fuente de la energía medida es el sol, entonces se llama la teledetección pasiva, y el resultado de esta medición puede ser una imagen digital. Si la energía medida no es emitida por el Sol, pero desde la plataforma de sensor, entonces se define como la teledetección activa, tales como sensores de radar que funcionan en el rango de microondas. Estas energías de radiación pueden ser clasificadas según su origen en tres tipos:

- Radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado).
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico).
- Radiación emitida por el sensor y reflejada (radar).

Las técnicas basadas en las primeras dos se les conoce como la teledetección pasiva y la última como teledetección activa (Bravo Morales 2017).

La teledetección da inicio en el año 1972 con el lanzamiento del primer satélite de la serie ERTS, verdadera clave de desarrollo de las aplicaciones de esta tecnología en todo el mundo. Y en el campo específico en la ocupación del suelo los satélites LANDSAT, los cuales han proporcionado una fuente de información idónea de inventarios. Es por ello que

las imágenes LANDSAT 8, son un buen recurso para el análisis de superficies, principalmente en el monitoreo de la vegetación (Chuvieco 1985, Hernández-Martínez 2019).

2.8.1. Ventajas de la teledetección

Chuvieco (1985), muestra algunas de las ventajas al emplear la teledetección:

- a) La visión sinóptica de una amplia superficie del terreno.
- b) Información concerniente a varias longitudes de onda.
- c) Cobertura periódica y relativamente rápida.
- d) Rapidez y economía de tratamiento.
- e) Versatilidad del tratamiento numérico.

2.8.2. Elementos de la teledetección

Según Chuvieco (1995), un sistema de teledetección incluye los siguientes elementos (figura 4):

01. **Fuente de energía:** supone el origen del flujo energético detectado por un sensor. puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por este (Teledetección activa). la Fuente de energía más importante es la solar.
02. **Cubierta terrestre:** conformada por las distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía y la refleja o emite de acuerdo a sus características físicas.
03. **Sistema sensor:** compuesto por el sensor, propiamente dicho, y la plataforma que lo sustenta. tienen como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
04. **sistema de recepción-comercialización:** donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado y tras las oportunas correcciones, se distribuye a los intérpretes.
05. **Intérprete:** analiza la información generalmente en forma de imágenes analógicas o digitales, convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema en estudio.
06. **Usuario final:** encargado de analizar el documento final de la interpretación, así como dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.



Figura 3. Elementos de la teledetección.
Fuente: Chuvieco (1995).

2.9. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index), se ha utilizado ampliamente como indicador del vigor de la biomasa vegetal, en estudios relacionados a comportamiento de cultivos, así como de vegetaciones boscosas naturales (Aguilar 2015).

Esperanza y Zerda (2002) estudiaron el comportamiento teórico de la vegetación vigorosa mostrando que los pigmentos del clorofila, xantofilas y carotenos tienen un efecto adsorbente, captando la radiación situada en torno a los $0,445 \mu\text{m}$, coincidente con el rango de la banda TM1. La clorofila presenta una segunda banda de absorción cercana a los

0,645 μm , perteneciente al rango de la banda TM3. Entre ambas porciones del espectro, aparece una banda intermedia, alrededor de los 0,55 μm , banda TM2, en donde el efecto absorbente es menor, mostrando así un máximo relativo de reflectividad.

Este índice es derivado de la combinación de las reflectancias captadas en el rango espectral del rojo e infrarrojo cercano (Aguilar 2015). Calculando con la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (\text{Eq. 1})$$

Donde:

NIR = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano.

R = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo.

2.9.1 Los valores de NDVI y su significado en las plantas.

El NDVI posee una escala de valores (Figura 5) que van desde los -1 hasta el 1. Los valores negativos representados en las imágenes terminas se corresponden a áreas con superficies de agua, estructuras hechas por el hombre, rocas, nubes o nieve: el suelo desnudo suele estar entre el rango de 0.1 a 0.2 y las plantas siempre tendrán valores positivos entre 0,2 y 1.

El dosel de la vegetación densa y saludable debería estar por encima de 0,5, y la vegetación dispersa muy probablemente estará dentro del rango de 0,2 a 0,5. Sin embargo, es sólo una regla general y hay que tener en cuenta la estación del año, el tipo de planta y las peculiaridades regionales para saber la interpretación de los valores del NDVI correcta (EOS 2020).

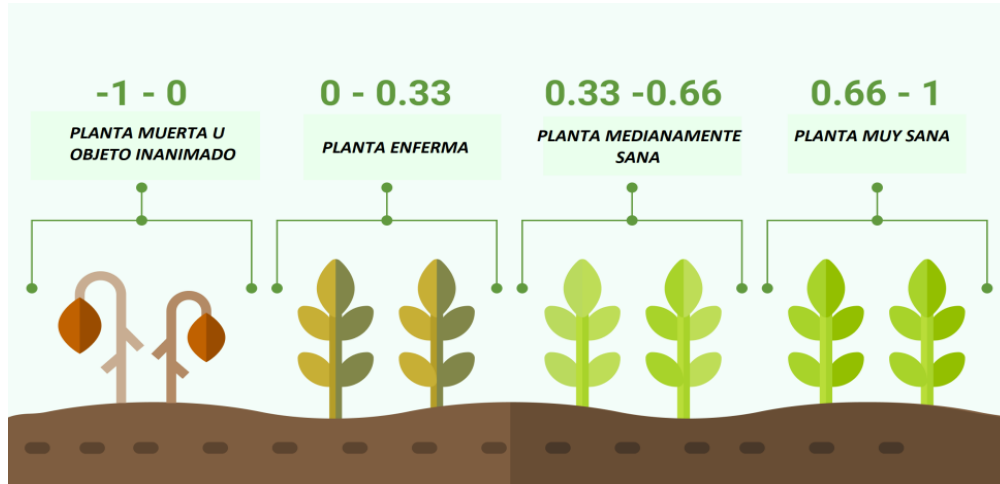


Figura 4. Valores de NDVI en plantas. Fuente: EOS (2020).

2.10. Índice de Temperatura y Sequedad de la Vegetación (TVDI)

2.10.1. Determinación del TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index)

Para determinar el Estrés Hídrico en las plantas se ha utilizado el TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) el cual fue propuesto por Sandholt *et al.* (2002) aplicando la siguiente ecuación:

$$TVDI = \frac{T_s - T_s \min}{a + b \cdot NDVI - T_s \min} \quad (\text{Eq. 2})$$

Donde T_s es la temperatura de superficie observada en el píxel (K), $T_s \min$ es la mínima temperatura de superficie (K), NDVI es el Índice de Vegetación Normalizado (Normalized Difference Vegetation Index), y "a" y "b" son parámetros propios para el área de estudio que se obtienen a partir de la relación existente entre NDVI y T_s . Los parámetros "a" y "b" se han estimado con la información contenida en la propia imagen (Sandholt *et al.* 2002).

Rivas *et al.* (2005), describen que el valor del TVDI varía entre 1 (límite seco) y 0 (límite húmedo) de acuerdo con lo mostrado en la Figura 5. Es decir que para un valor mínimo de T_s corresponde la máxima disponibilidad de agua en el suelo (máxima evaporación (Ev) y transpiración (T), y que para un valor máximo de T_s no existirá disponibilidad de agua en el suelo (nula Ev y T).

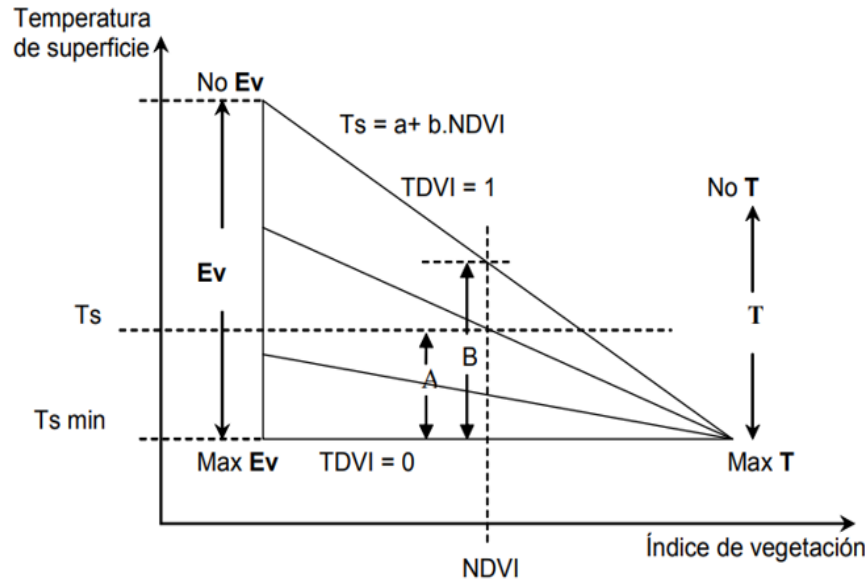


Figura 5. Descripción del TVDI.

El valor de TDVI para un píxel dado (NDVI, T_s) es la proporción entre las distancias A y B. Los símbolos son indicados en el texto. Fuente: Rivas et al. (2005).

2.10.2 Los valores de TVDI y su significado en las plantas.

El TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) combina temperatura de superficie con índice de vegetación y ha sido desarrollado para establecer el estado de la humedad (sequedad) del sistema suelo-planta (Holzman *et al.* 2012) y relacionado a su vez con el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

El TVDI no permite diferenciar las coberturas vegetales de los suelos (cultivos, pasturas, monte, entre otros). Este representa el déficit hídrico de la cobertura vegetal existente en las zonas de estudio, es por ello que donde la cobertura vegetal es escasa o nula (suelo desnudo, siembras incipientes), permite identificar el estado hídrico de la parte superficial del suelo la cual es aproximadamente de los 5 a 10 cm de profundidad (Holzman *et al.* 2012).

Para interpretar las escalas en el TVDI es necesario conocer que 0 indica la máxima humedad y 1 determina la máxima sequedad mostradas en las imágenes satelitales procesadas, se utiliza la siguiente clasificación las siguientes categorías (López Beltrán *et al.* 2016):

- Extremadamente húmedo (0.0 – 0.2).

- Altamente húmedo (0.2 – 0.4).
- Medianamente húmedo (0.4 – 0.6).
- Bajamente húmedo (0.6 – 0.8).
- Sequedad (0.8 – 1.0).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción de la zona de estudio

El área de estudio comprende la zona cultivada de caña de azúcar en los municipios de Jiquilisco, Puerto El Triunfo, San Dionisio, y Concepción Batres del departamento de Usulután y los municipios de San Jorge, San Rafael, El Transito y San miguel del Departamento de San Miguel, en la zona oriental de El Salvador, entre las coordenadas de 13°10.14' y 13°37.68' de Latitud Norte y 88°03.18' y 88°44.58'. (Figura 6)

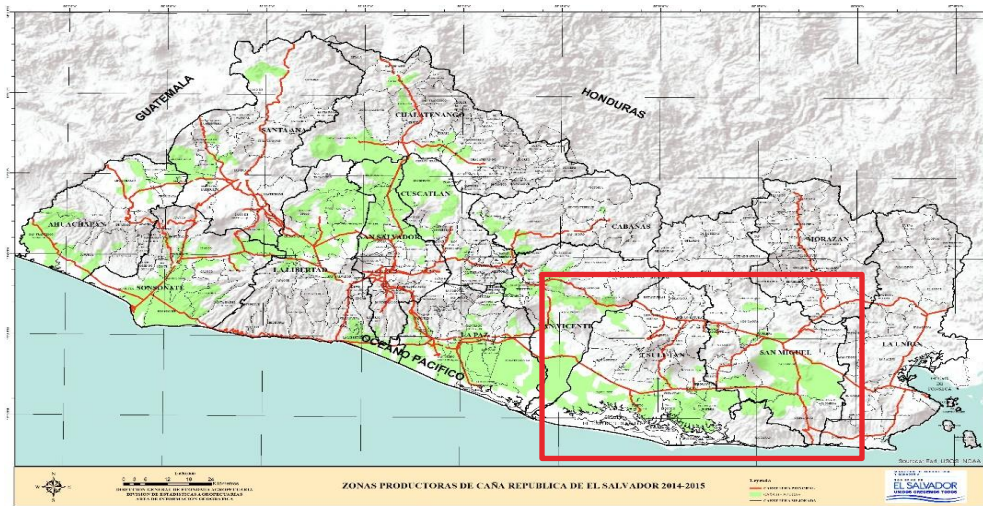


Figura 6. Zonas productoras de Caña, Republica de El Salvador.

Fuente: CONSAA 2016.

3.2 Tipo de Estudio

Este proyecto de investigación es del tipo de estudio descriptivo ya que pretende analizar los efectos del estrés hídrico en plantas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) para la producción de azúcar, así mismo entender cómo se manifestó el fenómeno de la sequía de los años 2014 y 2017 en la zona del corredor seco perteneciente a los departamentos de Usulután y San Miguel.

3.3 Metodología de laboratorio

Para cumplir con los objetivos de la investigación, fue necesaria la sistematización de información bibliográfica del cultivo y cartográfica de la zona en estudio. indagando de varias fuentes de datos. Esta información se detalla en el cuadro 1.

Tipo de información	Fuente
Cartográfica	

<p>A. Cartografía Base de El Salvador. B. Mapas de cobertura y uso de la tierra de El Salvador al año 2010. C. Imágenes Satelitales LANDSAT8 de los años 2014 y 2015.</p>	<p>Centro Nacional de Registros, Universidad de El Salvador, Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales/ MARN, Ministerio de Agricultura y Ganadería.</p> <p>Las Imágenes satelitales serán tomadas del repositorio de Glovis USGS (2019).</p>
Climática	
<p>A.-Datos meteorológicos (Precipitación y Temperatura) Mensuales del año 2010 al 2019.</p>	<p>Plataforma virtual de Global Climate Monitor.</p>

Cuadro 1. Información recopilada y su fuente.

Con la información sistematizada de las fuentes secundarias, se analizó el efecto del estrés hídrico en los cultivos de Caña de azúcar de los departamentos en estudio, analizando y comparándolo con el tipo de suelo y observando el comportamiento en los municipios de la zona en estudio para ello se hizo énfasis en los elementos que se describen a continuación:

- Análisis de TVDI mediante la teledetección, utilizando las imágenes satelitales de los satélites Landsat 8, y los datos meteorológicos agregados en la información satelital. Las imágenes satelitales contienen en su información 11 bandas, de las cuales se utilizaron las bandas B4, B5 y B10.
- Con la Cartografía recopilada se identificará las zonas cultivadas con caña de azúcar de los departamentos de Usulután y San Miguel.

Esta etapa de la investigación se realizó en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador sede Central. Las referencias espaciales se basaron en el Sistema de Coordenadas con Proyección cartográfica Cónica Conformal de Lambert y Datum Norteamericano de 1927, Trabajándose con los Software QGIS 3.10 el complemento Semi-Automatic Classifications Plugins (Congedo 2016) y ArcGIS, utilizando la aplicación ArcMap 10.7.1.

3.4 Análisis geográfico de la zona de estudio.

Para caracterizar la zona de estudio, se relacionarán las variables siguientes:

- a) **Área cultivada:** Se obtuvo del mapa de cobertura y uso de la tierra del año 2010, de la Universidad de El Salvador.
- b) **Profundidad y textura de suelos:** se utilizó el Levantamiento General de Suelos escala 1:50000, como fuente de información el Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- c) **División política administrativa de municipio y cantón,** como fuente de información el CNR.
- d) **Climatología de la zona de estudio:** con la información de las 6 estaciones meteorológicas del MARN con influencia en la zona.

3.5 Determinación de TVDI

$$TVDI = \left(\frac{LST - T_{min}}{(a * NDVI + b) - T_{min}} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Donde T_s es la temperatura de superficie observada en el píxel (K), T_{min} es la mínima temperatura de superficie (K), NDVI es el Índice de Vegetación Normalizado (Normalized Difference Vegetation Index), y “a” y “b” son parámetros propios para el área de estudio que se obtienen a partir de la relación existente entre NDVI y T_s . Los parámetros “a” y “b” se han estimado con la información contenida en la propia imagen (Sandholt *et al.* 2002).

Para determinar el TVDI o estrés hídrico, se desarrolló el siguiente proceso; en la calculadora ráster del ArcMap:

3.5.1. Obtención de imágenes satelitales LANDSAT8 y sus metadatos.

Se descargaron las imágenes satelitales desde la plataforma virtual de GloVis de NASA. Las imágenes obtenidas se procesaron, utilizando el complemento Semi-Automatic Classifications Plugins (Congedo 2016). disponible en QGIS 3.10, haciendo correcciones atmosféricas DOS (método de sustracción de objetos oscuros).

PATH	18
ROW	51
Fecha de Adquisición	2019-03-26
Scene Center Time	"16:11:43.4578190Z"
Coordenadas Geográficas	
Sistema de Referencia	DATUM = "WGS84"
Sistema de Proyección	MAP PROJECTION = "UTM"
Cobertura nubosa	0.92
RADIANCIA de las bandas TIRS	
RADIANCIA_MULT_BAND_10=	0.00033420
RADIANCIA_ADD_BAND_10=	0.10000
CONSTANTES DE TEMPERATURA	
K1_CONSTANT_BAND_10=	774.8853
K2_CONSTANT_BAND_10=	1321.0789

Cuadro 2. Metadatos de imágenes tipo LANDSAT 8.

Fuente: Hernández-Martínez 2019.

Los procesos descritos a continuación fueron realizados para cada una de las imágenes satelitales en estudio.

3.5.2. Determinación de la radiancia de la temperatura de brillo (TB)

Para determinar le temperatura de brillo en las imágenes satelitales se utilizaron los datos de la **Radiancia Multi Band 10** de la imagen multiplicada por el Ráster de la banda 10 relacionada a la temperatura, sumado a la Radiancia ADD Band 10 y como producto se obtiene un Ráster con la información en grados KELVIN y se procesaron a través del calculador ráster del ArcMap.

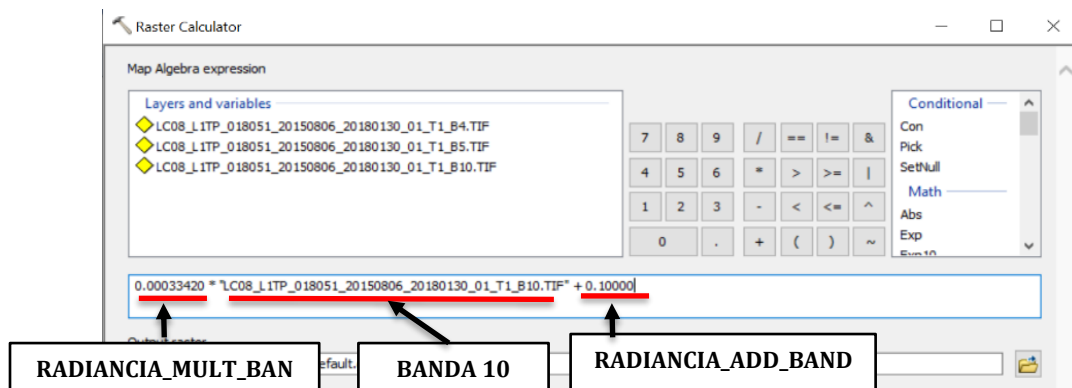


Figura 7. Formula aplicada de TB en el calculador ráster.

3.5.3. Determinación de la temperatura de brillo (T)

Para poder obtener los datos de la radiancia de la temperatura de brillo en grados Celsius se utilizó la constante térmica, aplicada mediante la siguiente formula:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{TB} + 1\right)} - 273.15 \quad (\text{Eq. 3})$$

T = Temperatura de brillo aparente en grados Kelvin (K).

TB = Corresponde a la radiancia en el techo de la atmosfera, Calculado en el paso anterior.

K_1 = Constante de conversión K1 específica (K1_CONSTANT_BAND_10).

K_2 = Constante de conversión K2 específica (K2_CONSTANT_BAND_10).

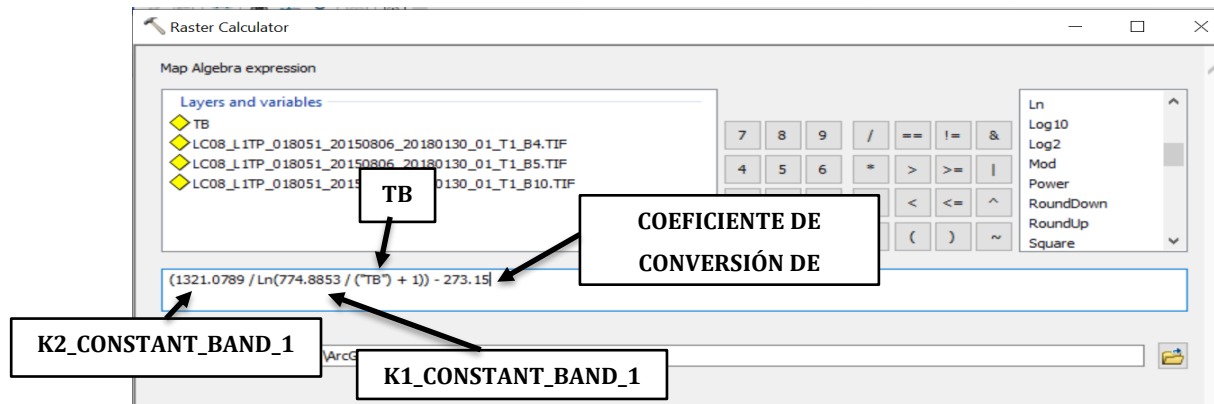


Figura 8. Formula aplicada de temperatura de brillo (T).

3.5.4. Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Para calcular el NDVI se utilizó la reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano (banda B5 de la imagen satelital) y reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo (Banda B4 de la imagen satelital) aplicando las siguiente formula:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (\text{Eq. 4})$$

Donde:

NIR= Es la reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano.

R= Es la reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo.

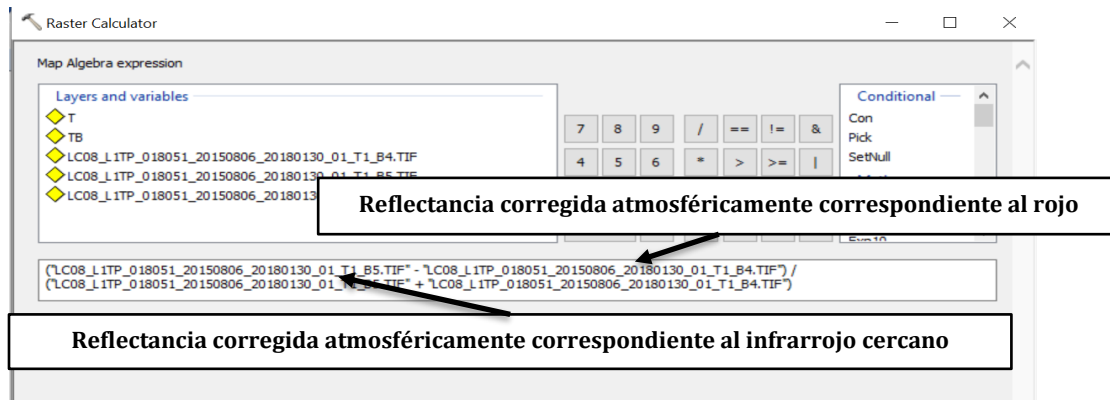


Figura 9. Aplicación de la fórmula para NDVI.

3.5.5. Cálculo de proporción de la vegetación (PV)

Para el cálculo de la Proporción de la Vegetación se utilizó los datos del ráster NDVI, aplicándolo de la siguiente manera:

$$PV = \left(\frac{(NDVI - NDVI \text{ mínimo})}{(NDVI \text{ máximo} - NDVI \text{ mínimo})} \right)^2 \quad \text{(Eq. 5)}$$

Donde:

NDVI= fue el ráster calculado en el paso anterior.

NDVI mínimo= El valor mínimo del ráster de NDVI.

NDVI máximo= El valor máximo del ráster de NDVI.

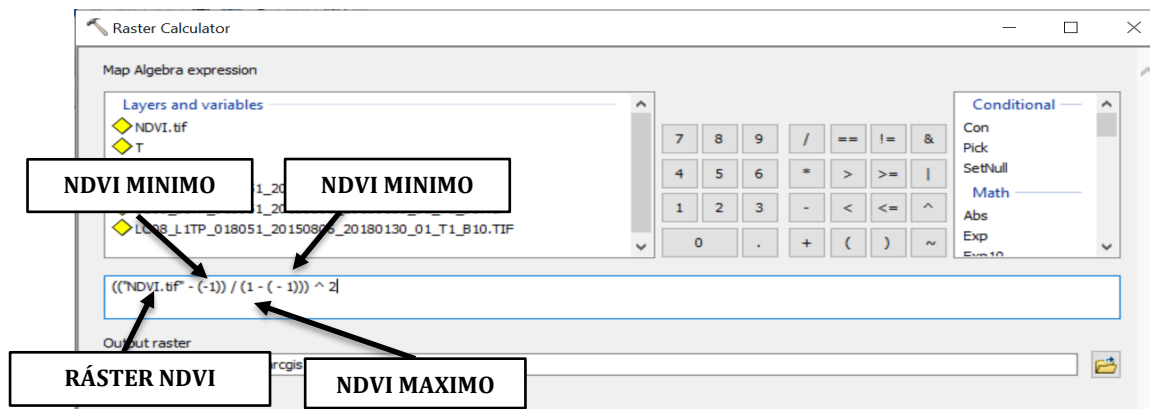


Figura 10. Aplicación de fórmula para PV.

3.5.6. Cálculo de la Emisividad de la Superficie de la Tierra (LSE) a partir del NDVI

Se utilizó el calculador ráster para calcular el LSE (Land Surface Emissivity), mediante la fórmula de:

$$\text{(Eq. 6)}$$

$$e = m.PV + n$$

Donde:

m: Emisividad promedio de la vegetación (0.004).

n: Emisividad promedio del suelo (0.986).

PV: Proporción de la vegetación.

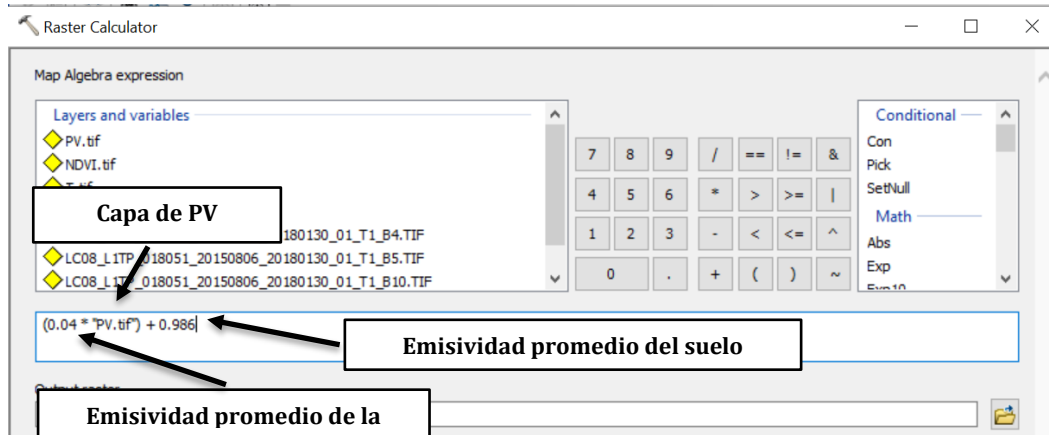


Figura 11. Aplicación de la fórmula para LSE.

3.5.7. Cálculo de la Temperatura de la Superficie de la Tierra (LST)

Para Calcular el LST se utilizó la siguiente formula:

$$LST = \left(\frac{T}{\left(1 + \left(\frac{\lambda * T}{C_2}\right)}\right)} * \ln LSE \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

Donde:

T= Es la Temperatura de Brillo en grados centígrados.

λ = Es la Longitud de onda de la radiancia emitida (0.00115).

C_2 = Coeficiente de la velocidad de la luz (1.4388).

LSE= Emisividad de la superficie de la tierra.

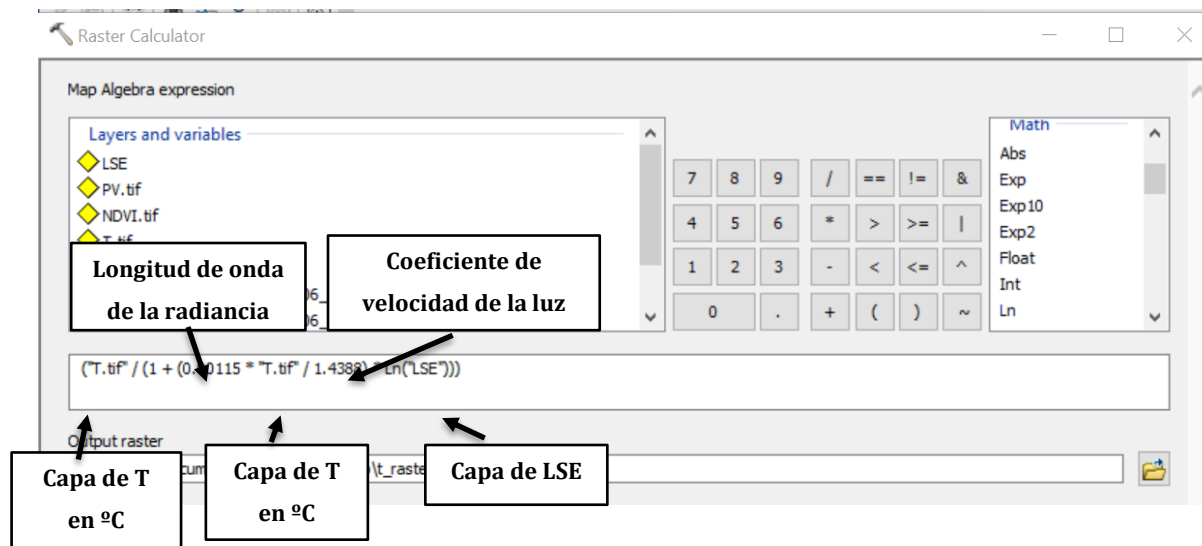


Figura 12. Aplicación de la fórmula para el LST.

3.5.8. Cálculo del índice de Temperatura y Sequedad de la Vegetación (TVDI)

Para llegar al cálculo del TVDI fue necesario la aplicación de los siguientes pasos:

Preparación de datos para el cálculo de TVDI.

Paso 1: Crear capas máscaras a los ráster de NDVI y LST, la capa máscara utilizada fue la zonificación del cultivo de caña; con la finalidad de conocer los valores de las zonas cañeras del lugar en estudio.

Paso 2: Con las capas máscaras ráster, se convirtieron a capas por punto, en la cual se extraen los datos de cada píxel contenido en el ráster, puesto que al crear esta capa cada píxel posee un identificador único que evita la confusión entre el dato de un píxel con otro. Esto con la finalidad de mantener la calidad de los datos procesados.

Paso 3: Se utilizaron los datos de la capa a través de la tabla de atributos para exportarlos a un documento Excel para su análisis.

Paso 4: Con los datos en Excel de NDVI y LST, se realizó el diagrama de dispersión utilizando el LST en el eje de las "Y" y el NDVI en las "X"; en este diagrama los puntos graficados se mostrarán en forma de un triángulo el cual indica los límites secos de los datos. A este gráfico se le coloca la línea de tendencia y su ecuación, en la cual brindara los datos para aplicarlos en el cálculo del TVDI.

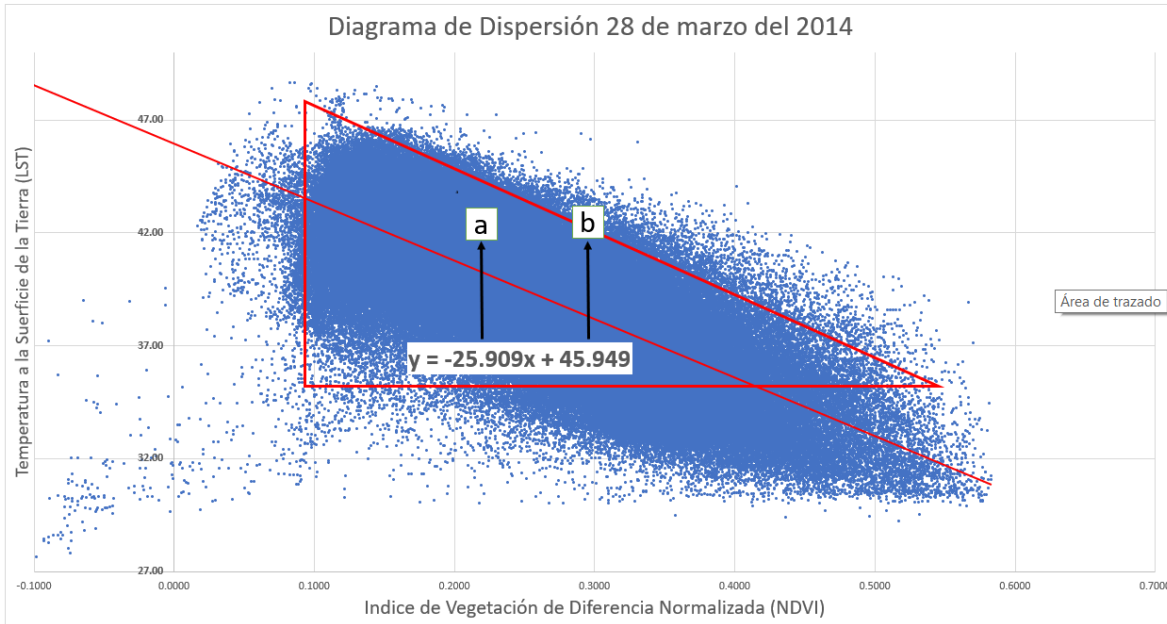


Gráfico 1. De dispersión realizado.

Paso 5: Cálculo del TVDI utilizando la siguiente fórmula.

(Eq. 8)

$$TVDI = \left(\frac{LST - T_{min}}{(a * NDVI + b) - T_{min}} \right)$$

Donde:

LST= Es el ráster de LST extraído en mascara del cultivo de caña.

T_{min}= Es la temperatura mínima registrada en mascara del LST.

NDVI = Es el ráster de NDVI extraído en mascara del cultivo de caña.

a y *b*= Son parámetros que definen el límite seco del triángulo modelado como el ajuste lineal de los datos (definidos en el diagrama de dispersión).

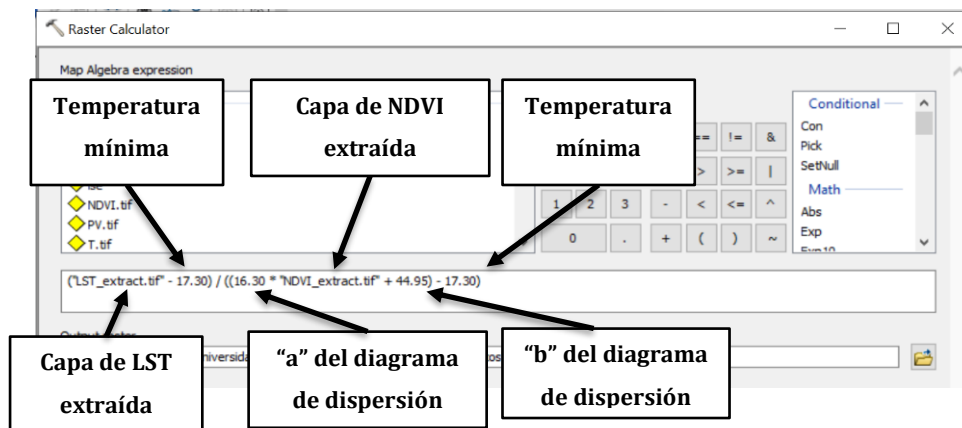


Figura 13. Aplicación de fórmula para TVDI.

3.5.9. Grafica del comportamiento de TVDI durante los años en estudio

Para poder observar el comportamiento del TVDI de cada una de las imágenes satelitales durante los años en estudio fue necesario seguir los siguientes pasos:

Paso 1: Como el ráster de TVDI fue realizado a partir de las máscaras de NDVI y LST, el resultado fue un máscara de TVDI, se procedió a convertir dicho ráster en una capa por puntos, para poder extraer la información de cada píxel.

Paso 2: Con la capa de puntos TVDI creada, se utilizó su tabla de atributos para poder exportar cada dato a un documento Excel.

Paso 3: Con todos los datos contenidos en Excel se procedió a determinar el promedio de TVDI por imagen.

Paso 4: Se compilo cada uno de los promedios por imagen satelital en una tabla por año.

Paso 5: Se realizó un gráfico lineal del comportamiento del TVDI por año, utilizando la fecha de la imagen satelital en el eje de las "X" y los valores de TVDI en las "Y".

3.6 Variables relacionadas al TVDI.

3.6.1. Los tipos de suelos y municipios relacionados al Índice de Temperatura y Sequedad de la Vegetación (TVDI).

Para relacionar los tipos de suelo y los municipios de la zona en estudio con el TVDI, fue necesario utilizar la capa de pedología y municipios proporcionada por la Facultad de Ciencias Agronómicas, y se realizaron los siguientes pasos:

Paso 1: Incorporación de las capas de Municipios y Pedología al proyecto guardado de las imágenes satelitales.

Paso 2: en la caja de herramientas del ArcMap selecciona la caja de herramientas **Spatial Analyst Tools**, luego la opción **Zonal** para utilizar la herramienta de **Zonal Statistic**.

Paso 3: aplicación de Zonal Statistic en las imágenes satelitales, utilizando el promedio como el tipo de estadística como se describe en las siguientes figuras.

- Capa de Municipios relacionada al ráster máscara de TVDI.

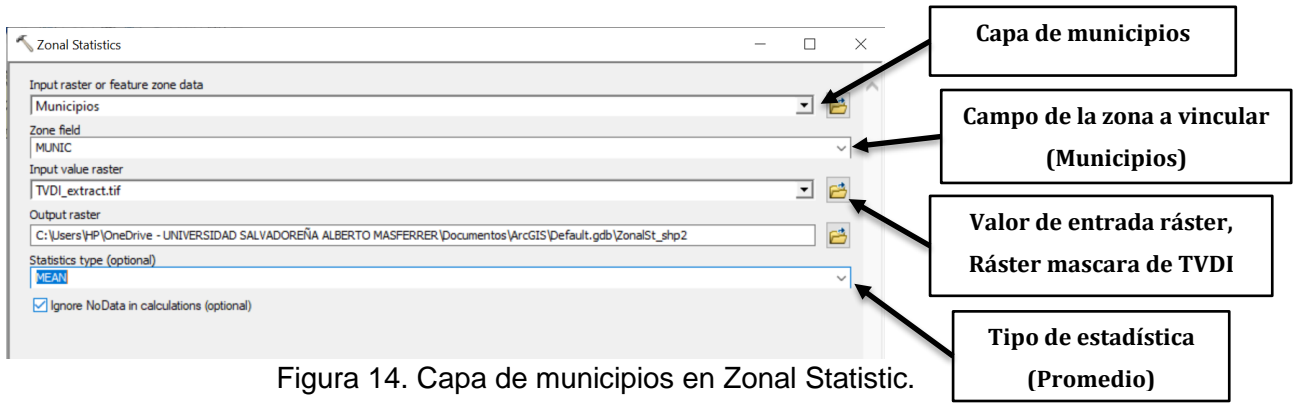


Figura 14. Capa de municipios en Zonal Statistic.

- Capa de tipos de suelos (Pedológico) relacionado al ráster mascara de TVDI

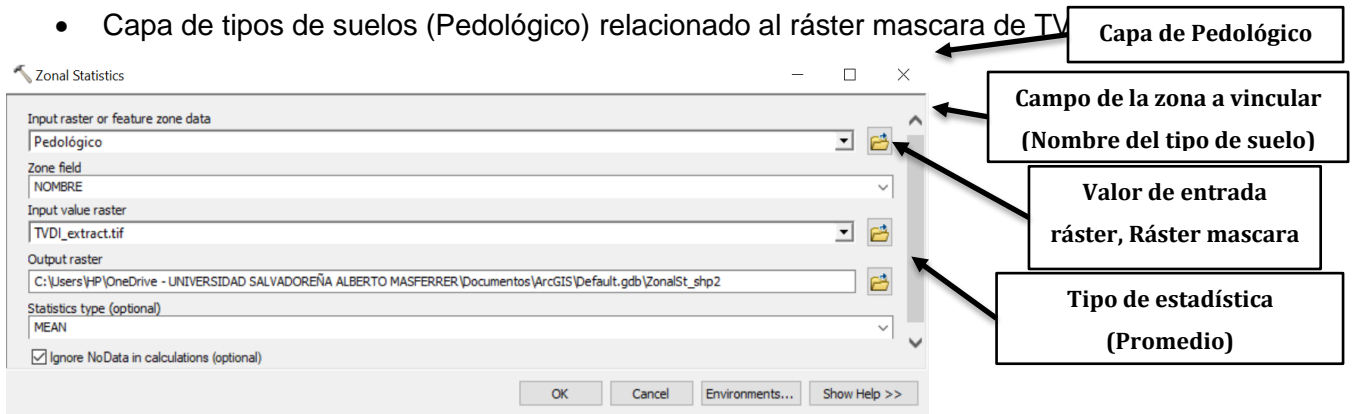


Figura 15. Capa de tipos de suelos en Zonal Statistic.

Como resultado de la aplicación de **Zonal Statistic** se obtiene las imágenes ráster con la información del comportamiento del TVDI en relación con los municipios y los tipos de suelo de la zona en estudio.

3.7 Datos Climatológicos de los años 2010 al 2019.

Los datos climáticos de la precipitación y temperatura promedio fueron obtenidos en la plataforma denominada Global Climate Monitor (Camarillo Naranjo et al. 2019) (figura 16), el cual es un visor web del clima global que contiene información climática accesible desde 1901, siendo un proyecto de código abierto desarrollado por el Grupo de Investigación del Clima de la Universidad de Sevilla.

Se obtuvieron los datos de precipitación y temperatura desde el año 2010 hasta el año 2019, con la intención de conocer el comportamiento climático de los años en estudio y compararlos con el comportamiento de los otros años. Para ello se siguieron los siguientes pasos:

Paso 1: Ubicación geográfica de El Salvador, esto se realizó en la plataforma virtual de Global Climate Monitor, en la cual se ubicó en el mapa global el país de El Salvador.



Figura 16. Ubicación geográfica de El Salvador.

Paso 2: Ubicación geográfica de la zona en estudio, Se realiza el acercamiento de mapa de El Salvador, y se identifica la zona estudiada.

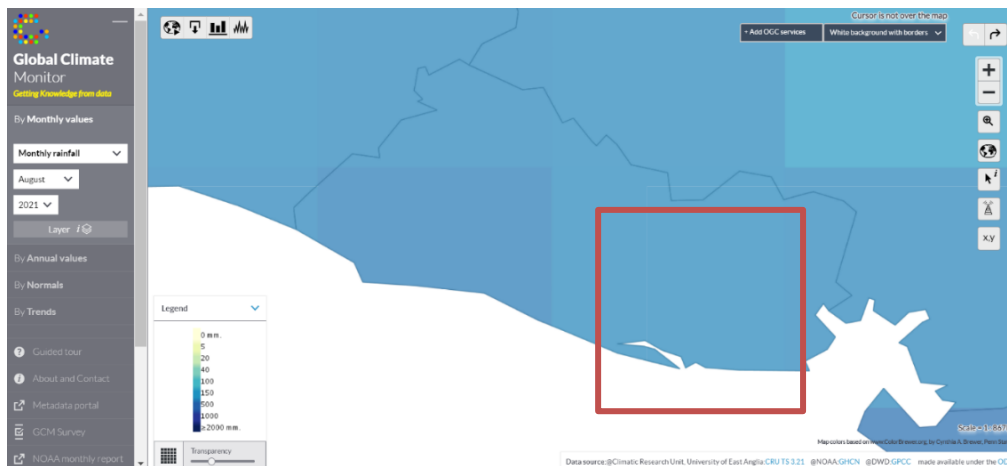


Figura 17. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

Paso 3: Descarga de datos: Para esta descarga es necesario observar el botón de **Download Options**, la descarga de datos utilizada en este estudio fue **Download a bounding box**; En esta se selecciona con un rectángulo la zona en estudio, ya seleccionada se despliegan las siguientes opciones:

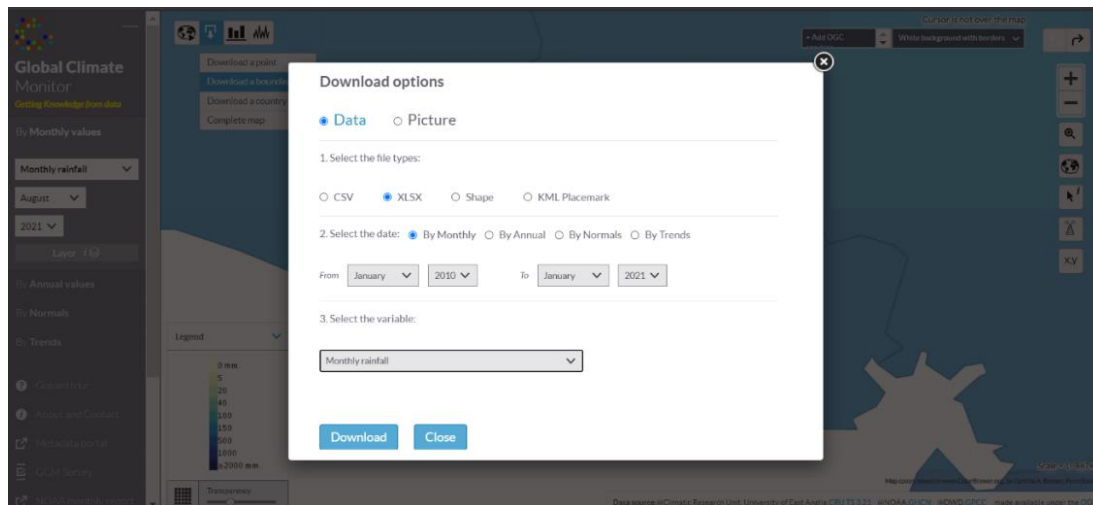


Figura 18. Descarga de datos climáticos.

Este procedimiento se realiza tanto para las precipitaciones mensuales como para las temperaturas mensuales. La base de datos es descargada en formato de Excel donde brinda el promedio mensual en mm y los meses en formato numérico.

Paso 4: Grafico histórico de precipitaciones y temperatura: Con la base de datos en Excel se le cambio el valor numérico de los meses a los nombres de cada mes, utilizando esta variable en el valor de las “X” y se utilizaron los promedios de precipitación temperatura en el eje de las “Y”. Dicho grafico fue tomado en cuenta para el análisis de resultados del estudio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

4.1.1 Comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

durante el año 2014

N.º	Fecha de la captura de imagen en el año 2014	NDVI	NDVI de referencia*
1	23 de enero	0.2815	0.21
2	24 de febrero	0.2514	0.36
3	28 de marzo	0.2467	0.44
4	13 de abril	0.2320	0.83
5	02 de julio	0.4055	0.77
6	18 de julio	0.4273	0.56
7	06 de octubre	0.4792	0.55
8	07 de noviembre	0.4566	0.34
9	23 de noviembre	0.4151	0.70
10	25 de diciembre	0.3065	0.70

Cuadro 3. Valores promedios de NDVI en las imágenes tipo LANDSAT 8 del año 2014.
*Valores de referencia tomados de Aguilar-Rivera *et.al.* (2015).

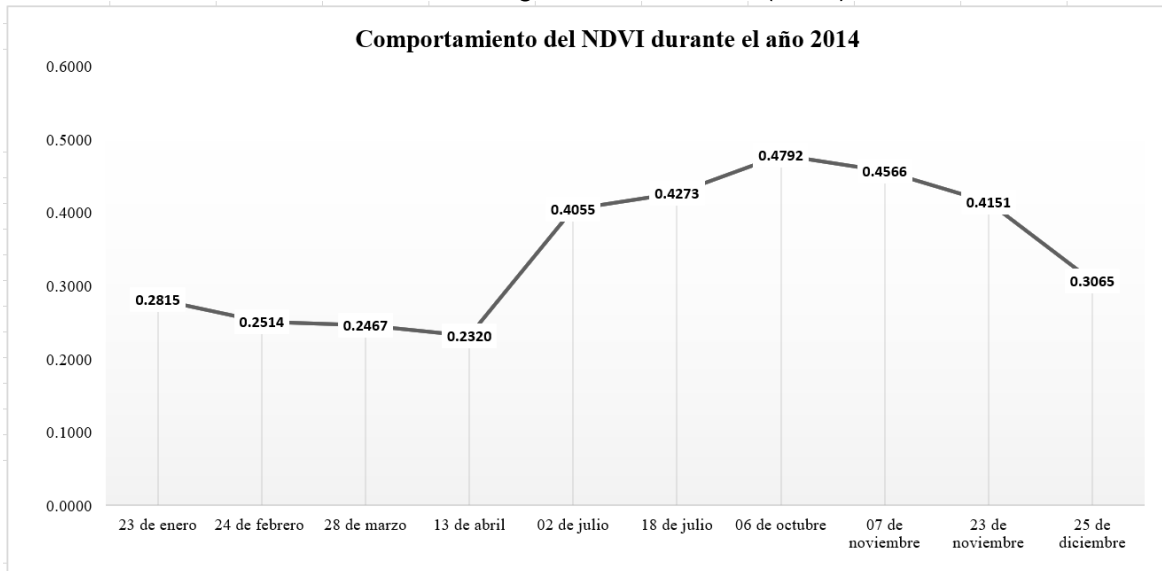


Gráfico 2. Comportamiento del NDVI durante el año 2014.

De acuerdo con la fenología del cultivo de caña de azúcar (Figura 3) y a los valores del NDVI (Figura 5), se muestra que durante la fase de brote se tuvo un promedio de rango de entre los 0.25 y 0.28 lo cual podría clasificarse como una planta enferma, sin embargo, existieron regiones que presentaban valores superiores al 0.50 con lo cual dichas regiones se clasifican como medianamente sanas.

Durante la fase de macollaje se observó un déficit en el NDVI, lo que indica un riesgo en las plantaciones de caña de azúcar, ya que en esta fase se observó el valor más bajo, siendo este de 0.23 clasificando las plantas como plantas enfermas.

En la fase del gran crecimiento debido al cierre de cañaveral y las condiciones climáticas se observa un aumento en los valores de NDVI, los cuales oscilaron entre 0.40 y 0.47 alcanzando el NDVI mayor en el mes de octubre. Debido al rango en el cual se encontraron las plantas, estas se podrían clasificar como medianamente sanas el cual oscila entre 0.33 a los 0.66.

Y en la fase de maduración nuevamente se observó un déficit, pasando de plantas medianamente sanas a plantas enfermas, es necesario aclarar que durante esta fase se inicia los procesos de cosecha, por lo que esto podría alterar los valores encontrados en las imágenes satelitales del año 2014; clasificándolas como plantas enfermas.

4.1.2 El comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) durante el año 2015

Nº	Fecha de la captura de imagen en el año 2015	NDVI	NDVI de referencia*
1	10 de enero	0.2352	0.21
2	15 de marzo	0.2184	0.36
3	31 de marzo	0.2310	0.44
4	05 de mayo	0.1899	0.83
5	18 de mayo	0.2676	0.77
6	06 de agosto	0.3166	0.56
7	09 de octubre	0.4710	0.55
8	26 de noviembre	0.4352	0.34
9	12 de diciembre	0.3571	0.70
10	28 de diciembre	0.2380	0.70

Cuadro 4. Valores de NDVI en las imágenes satelitales tipo LANDSAT 8, del año 2015.
*Valores de referencia tomados de Aguilar-Rivera *et.al.* (2015).

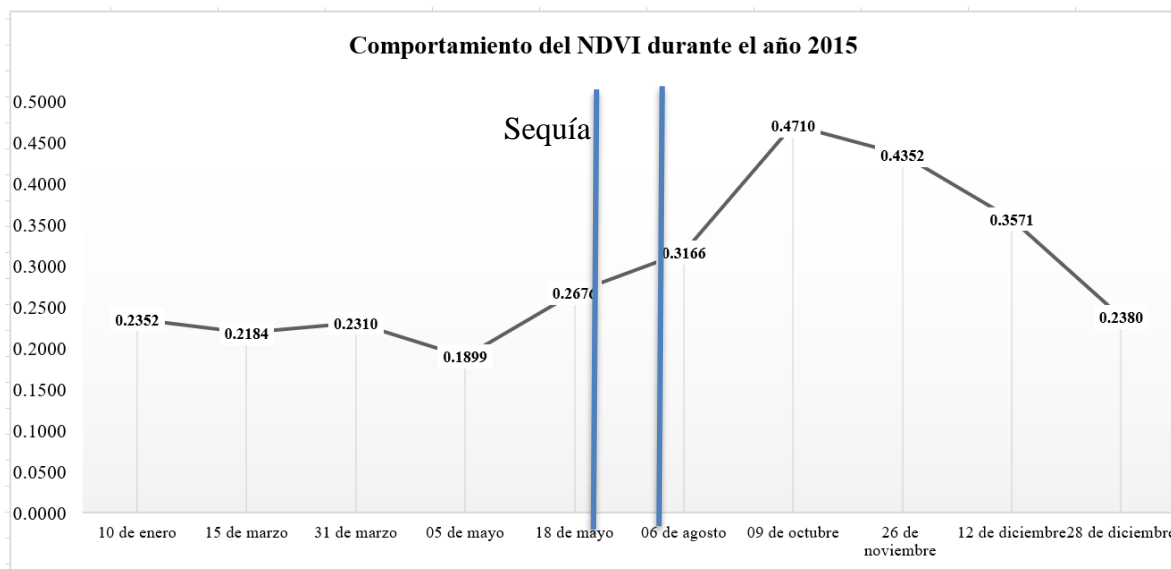


Gráfico 3. Comportamiento del NDVI durante el año 2015.

Durante el año 2015, en el gráfico 3 se observa mayor afectación de la sequía en las plantas de caña de azúcar, demostrando que, durante la fase de brote (enero-marzo), macollaje (marzo-mayo) y parte del gran crecimiento se registró un rango de NDVI de entre los 0.1899 hasta los 0.3166, una afectación a ese nivel de desarrollo de las plantas repercute en mayor proporción durante la producción de esta, con lo que se interpreta que para ese año la sequía afectó muy fuertemente la producción de azúcar en El Salvador.

Durante las fases de maduración y cosecha de la caña los valores de NDVI se mantuvieron en el rango de entre los 0.4352 y los 0.4710, lo que significa que en esas fases las plantas se encontraban en la clasificación de medianamente sanas.

De acuerdo con EOS (2020). Las imágenes satelitales que brindan la información del cultivo de caña de azúcar se encuentran en las clasificaciones de plantas enfermas y plantas medianamente sanas.

4.2 La Temperatura a la Superficie de la Tierra

4.2.1 El comportamiento de la Temperatura a la Superficie de la Tierra (LST) durante los años 2014 y 2015

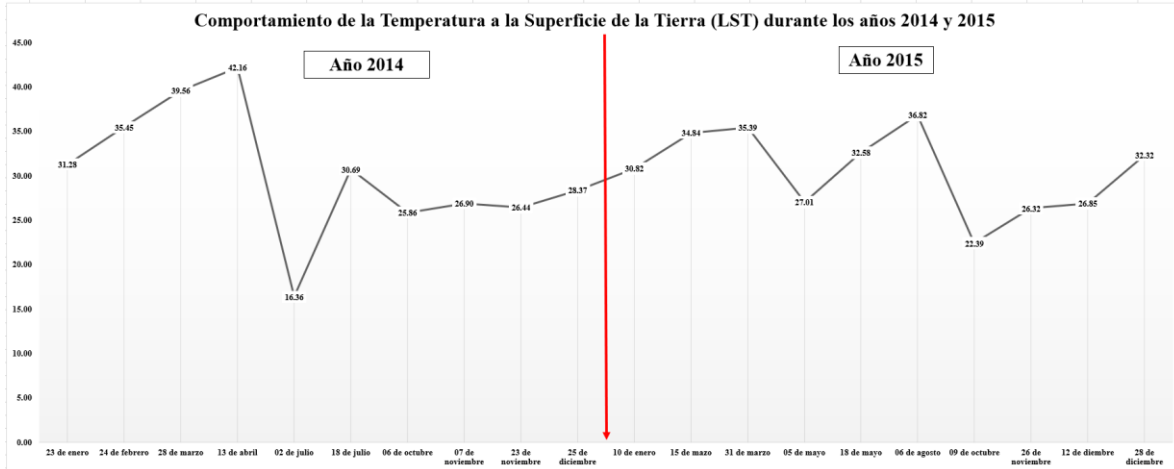


Gráfico 4. Comportamiento del LST durante los años 2014 y 2015.

En ambos años durante la germinación y desarrollo radicular se observó que las temperaturas de la superficie se mantuvieron en el rango óptimo de acuerdo con la investigación de Duarte-Álvarez y Gonzáles-Villalba (2019), los cuales afirman que la temperatura para dicha fase debe de oscilar entre los 26 a los 33°C.

En las fases de macollaje y gran crecimiento, se obtuvo en las imágenes satelitales una LST alta de 42.16 °C y la más baja de 16.36 °C en el año 2014 (Cuadro A-1), al contrario en el año 2015 que se mantuvo estable en los rangos; la mayor parte de los meses de dichas fases se encontraron fuera del rango óptimo propuesto por Duarte-Álvarez y Gonzáles-Villalba (2019) el cual debe de mantenerse entre los 30 y 34 °C, ellos afirman que por debajo de los 15 y arriba de los 38 °C la planta de Caña de Azúcar paraliza su crecimiento, afectando en así la producción de azúcar. Los meses de marzo, abril y julio las plantas detuvieron su crecimiento.

En la fase de maduración las LST se mantuvieron en temperaturas bajas, lo cual favorece la producción y almacenaje de sacarosa y su crecimiento es reducido de acuerdo con Duarte-Álvarez y Gonzáles-Villalba (2019).

4.3 Índice de Temperatura y Sequedad de la Vegetación (TVDI).

4.3.1 El comportamiento de la Temperatura y Sequedad de la Vegetación durante los años 2014 y 2015

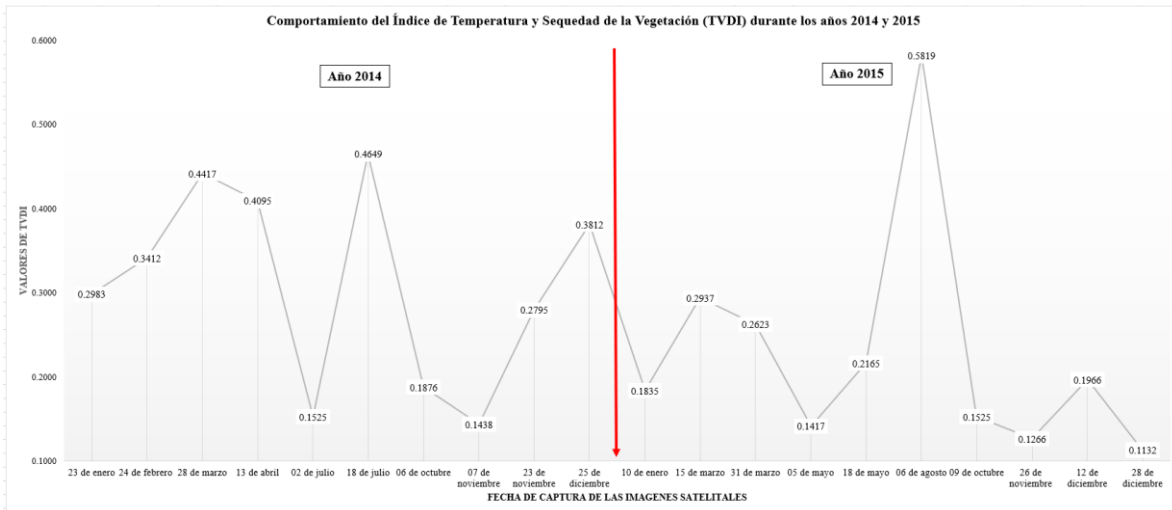


Gráfico 5. Comportamiento de TVDI durante el año 2014 Y 2015.

Para el gráfico 5, es importante tomar en cuenta que, para dicha sistematización, se utilizó los datos promedio de las imágenes satelitales por lo que en algunas regiones de las zonas en estudio los datos de TVDI son mayores o menores.

Durante el año 2014 se observa el comportamiento del TVDI relativamente estable aumentando en los meses de marzo correspondiendo a la fase de macollaje y en el mes de julio correspondiendo a la fase de desarrollo; a diferencia del comportamiento para el 2015 se observa más fluctuante aumentando el estrés hídrico en el mes de agosto que corresponde a la fase de gran crecimiento o desarrollo por lo que de acuerdo a López-Beltrán *et al.* 2016. El promedio de la zona en estudio podría ser calificado como medianamente húmedo el cual comprende el rango entre los 0.4 y los 0.6 (Anexos 3 y 4).

Es necesario aclarar que las imágenes satelitales no están 100% libres de nubes por lo que afecta en los datos mostrando bajos de las categorías de extremadamente húmedo (0.0 - 0.2) y altamente húmedo (0.2 - 0.4).

4.4. TVDI con su relación a la pedología y su efecto en los municipios de la zona en estudio para el año 2014

A continuación, se presentan las imágenes satelitales más representativas del estudio, del año 2014; todas las imágenes procesadas están expresadas en los Anexos (Figura A-5 a A-22). Con su respectivo análisis sobre la relación del tipo de suelo y el TVDI; así como los municipios más afectados por el estrés hídrico en las zonas de estudio.

4.4.1. Imágenes satelitales capturada el 23 de enero del 2014

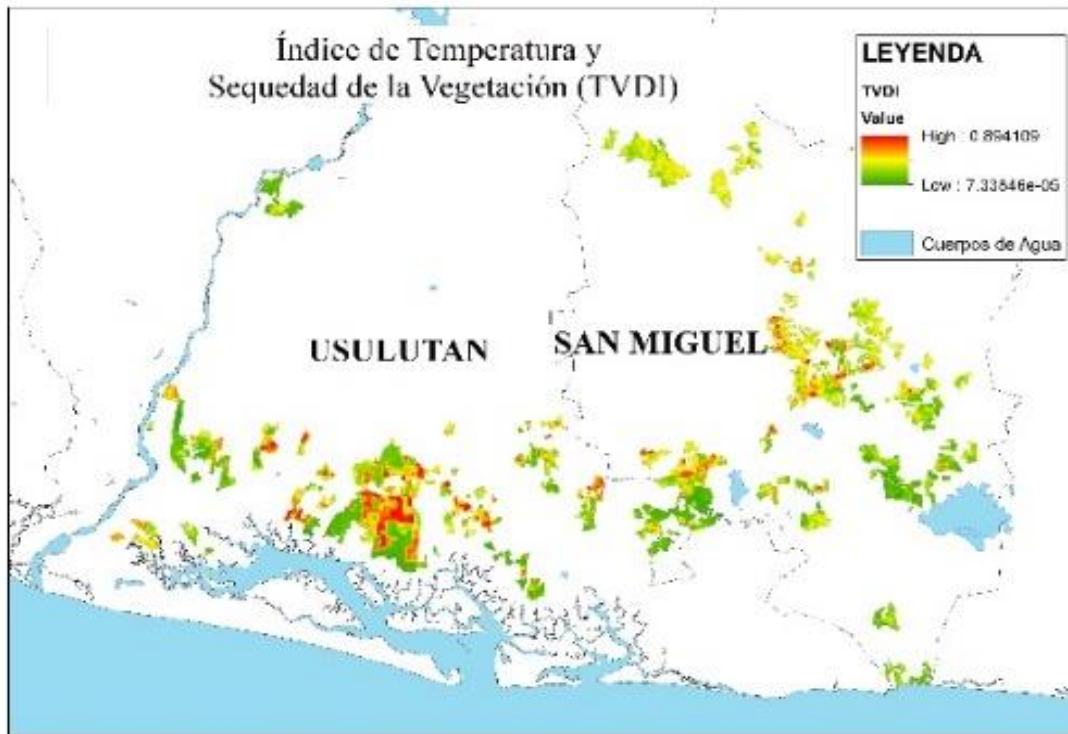


Figura 19. Mapa de TVDI, 23 de enero del 2014.

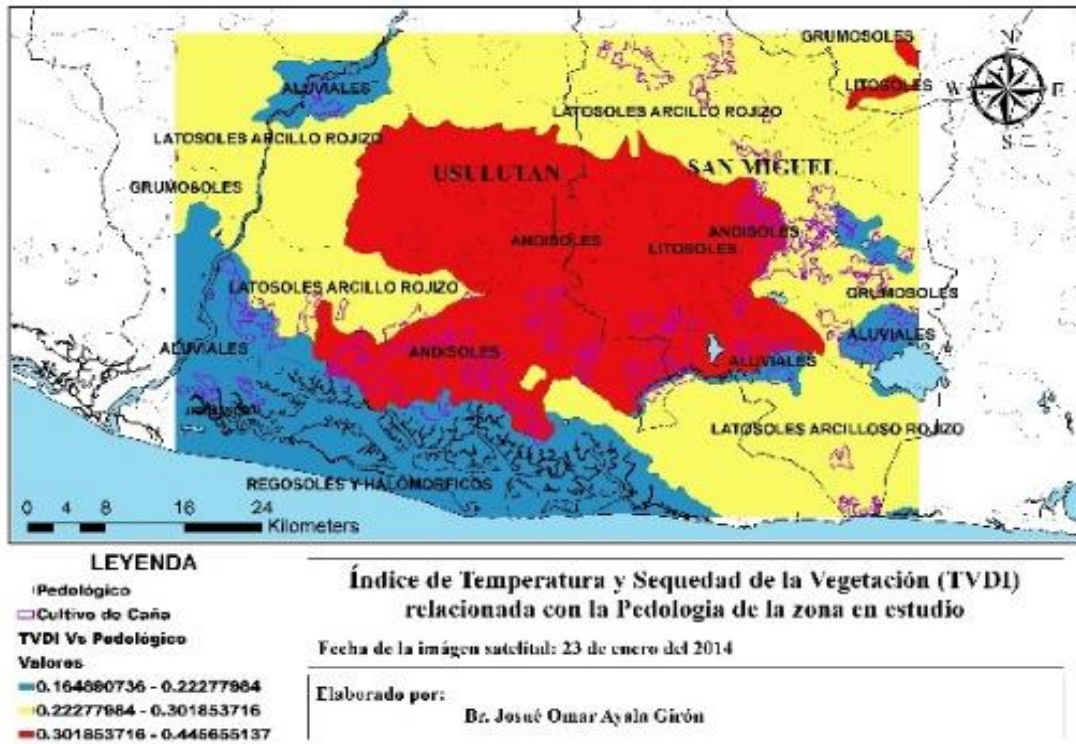


Figura 20. TVDI y su relación con la pedología, 23 de enero del 2014.

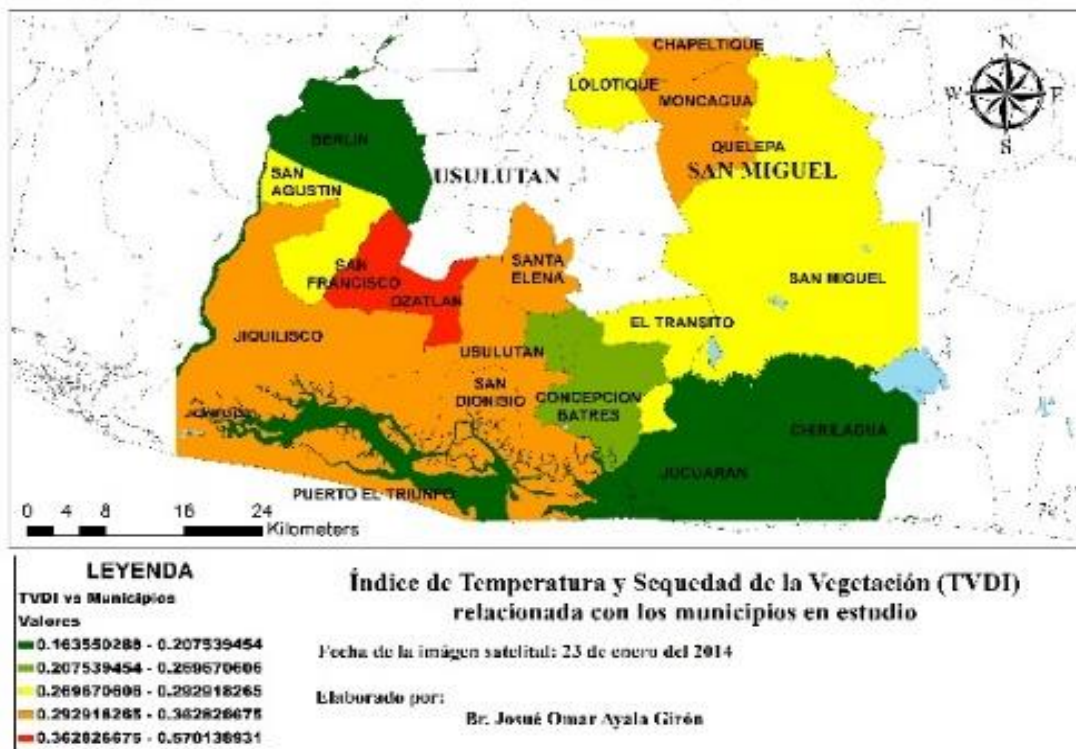


Figura 21. TVDI y su relación con los municipios, 23 de enero del 2014.

Como se observa en los resultantes del procesamiento de las imágenes satelitales, para esta imagen se identificó que los suelos andisoles y litosoles fueron los más afectados por el estrés hídrico; esto se debe a la estructura del suelo ya que Moreno-Ramón *et al.* (2011) menciona que los suelos andisoles se encuentra sobre material piroclástico expulsado por las erupciones volcánicas, lo cual provoca que tenga poca retención de agua en su estructura estresando de esta forma las plantas.

Los suelos litosoles son de poca profundidad y se encuentran sobre roca pura, en su mayoría son suelos que han sido afectados por una severa erosión laminar, sus texturas varían de gruesa, arenas y gravas hasta muy pedregosos por lo que Bautista et al. (2015), los caracteriza por suelos de bajo rendimientos.

Los municipios más afectados y que son cultivadores de caña de azúcar para la fecha del 23 de enero del 2014; fueron parte de Jiquilisco y San Dionisio en el Departamento de Usulután y del Departamento de San Miguel los municipios más afectados fueron El Transito y San Miguel.

4.4.2. Imágenes satelitales capturada el 13 de abril del 2014.

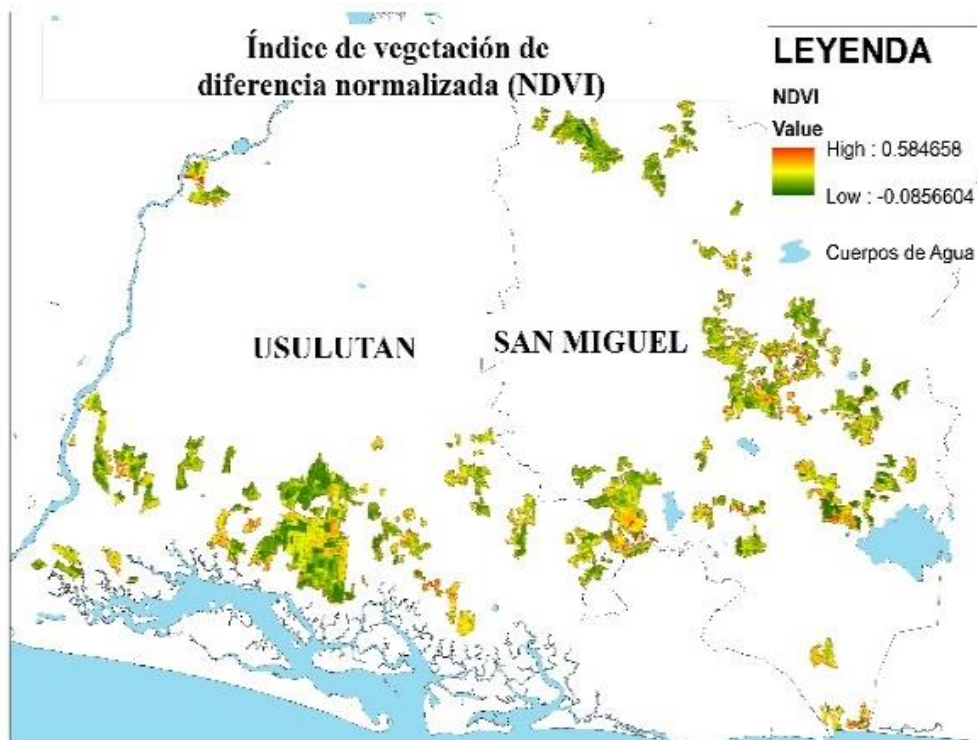


Figura 22. Mapa de TVDI, 13 de abril del 2014.

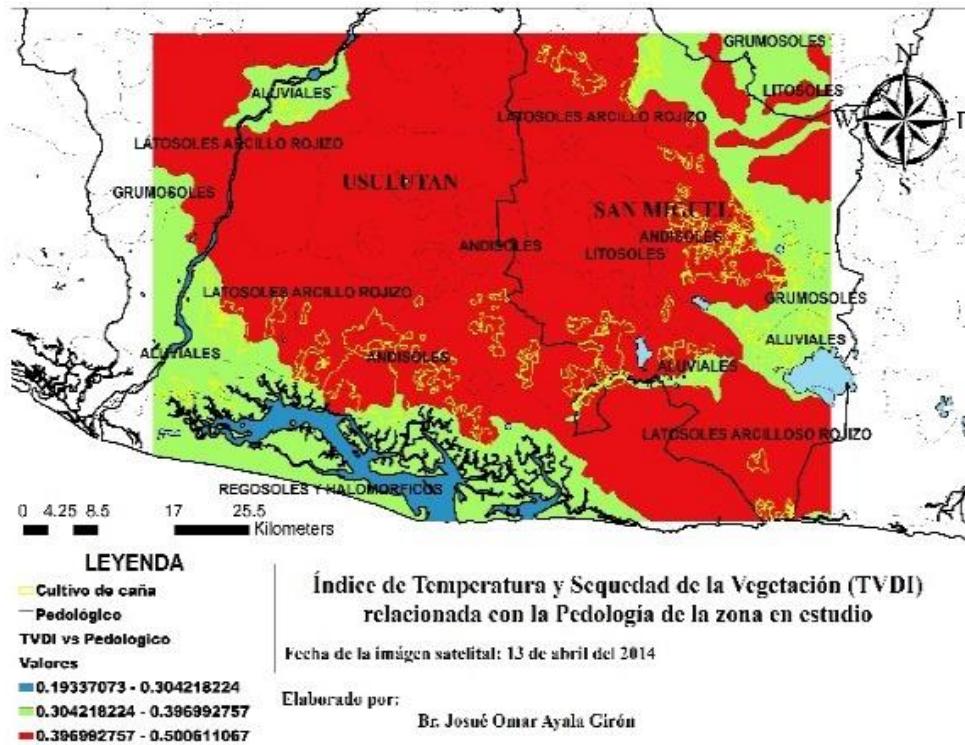


Figura 23. TVDI y su relación con la pedología, 13 de abril del 2014.



Figura 24. TVDI y su relación con los municipios, 13 de abril del 2014.

Las plantas que estuvieron en los suelos Latosoles Arcillo Rojizo, Andisoles y Litosoles mostraron mayor estrés hídrico para el mes de abril; en el rango de 0.30 a 0.50 clasificando a esas plantas como plantas medianamente húmedas, lo cual podría retrasar el crecimiento de dichas plantas de acuerdo con López Beltrán *et al.* 2016. Los andisoles y los litosoles son suelos poco profundos y susceptibles para más afectados por el estrés hídrico.

Los municipios en donde se cultiva caña con mayor afectación fueron Concepción Batres y Jiquilisco del Departamento de Usulután, para el Departamento de San Miguel fueron El Tránsito, San Miguel, Moncagua y Lolotique.

4.4.3. Imágenes satelitales capturada el 18 de julio del 2014

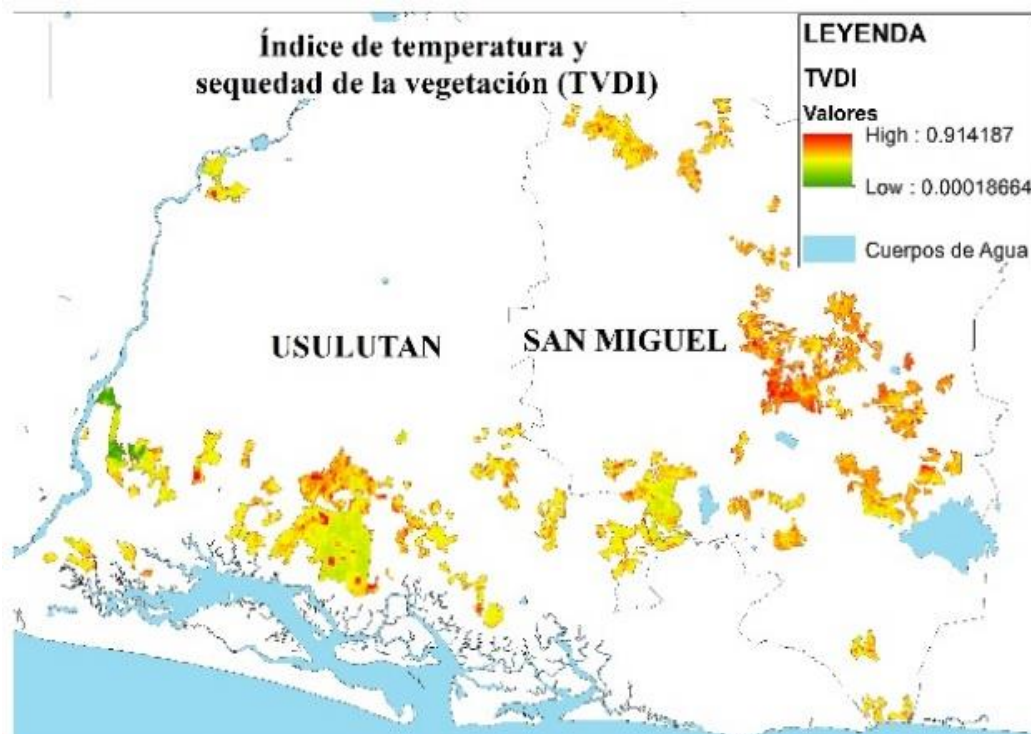


Figura 25. Mapa de TVDI, 18 de julio del 2014.

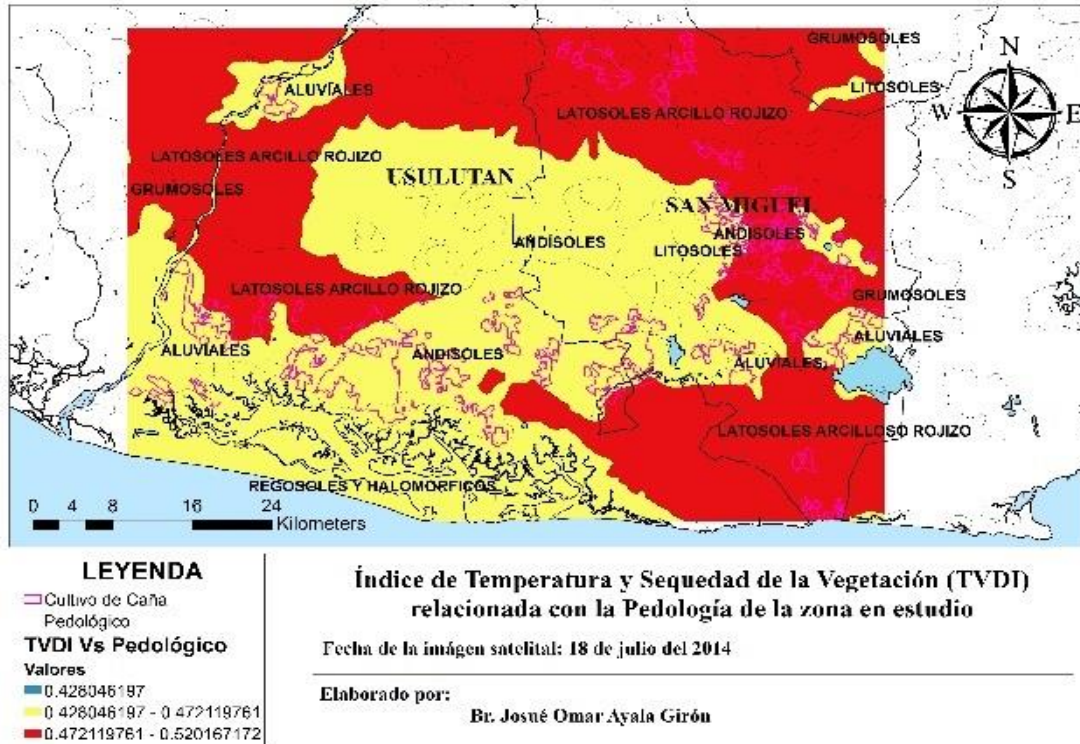


Figura 26. TVDI y su relación con la pedología, 18 de julio del 2014.

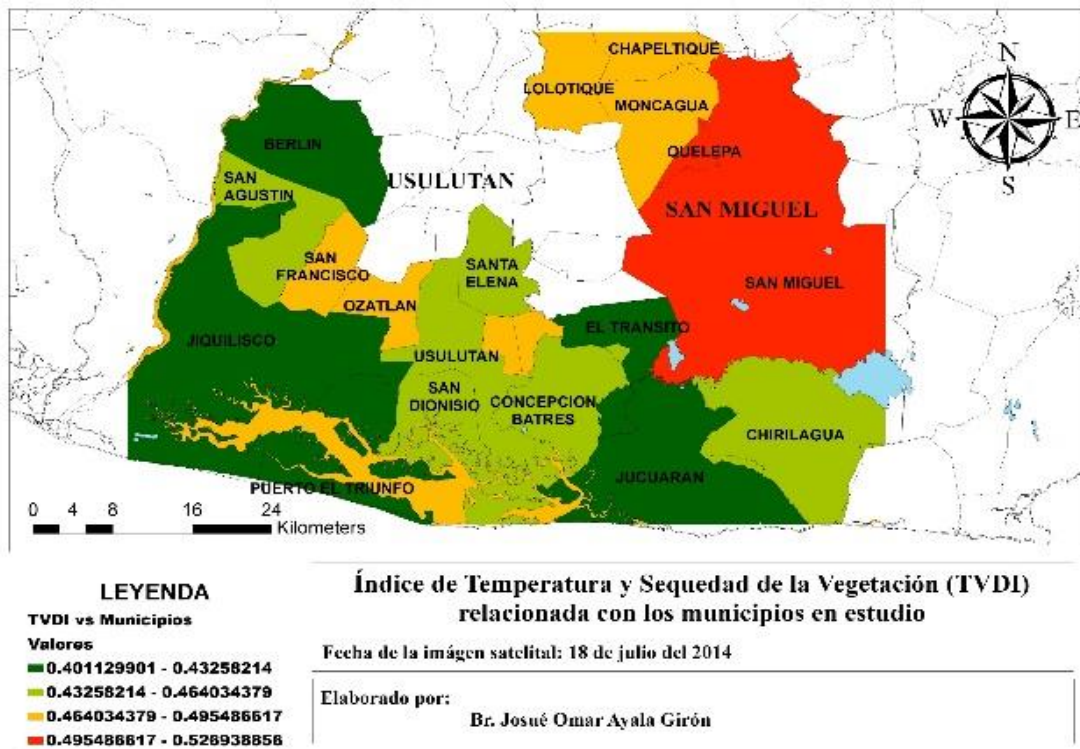


Figura 27. TVDI y su relación con los municipios, 18 de julio del 2014.

Las plantas que estuvieron en los suelos Latosoles Arcillo Rojizo y Grumosoles mostraron mayor estrés hídrico para el mes de Julio, ya que ambos suelos son de textura Arcillosa, en el caso de los suelos Grumosoles estos en las temporadas de pocas lluvias suelen ser duros y se rajan volviéndolos muy susceptibles a ser más afectados por la sequias; estos se encontraron en el rango de 0.47 a 0.52 clasificando a esas plantas como plantas medianamente húmedas, lo cual podría retrasar el crecimiento de dichas plantas de acuerdo con López Beltrán *et al.* 2016.

Para el mes de julio el departamento con mayor afectación por el estrés hídrico fue el departamento de San Miguel, en sus municipios de San Miguel y en una proporción más baja el municipio de Moncagua.

4.4.4. Imágenes satelitales capturada el 23 de noviembre del 2014

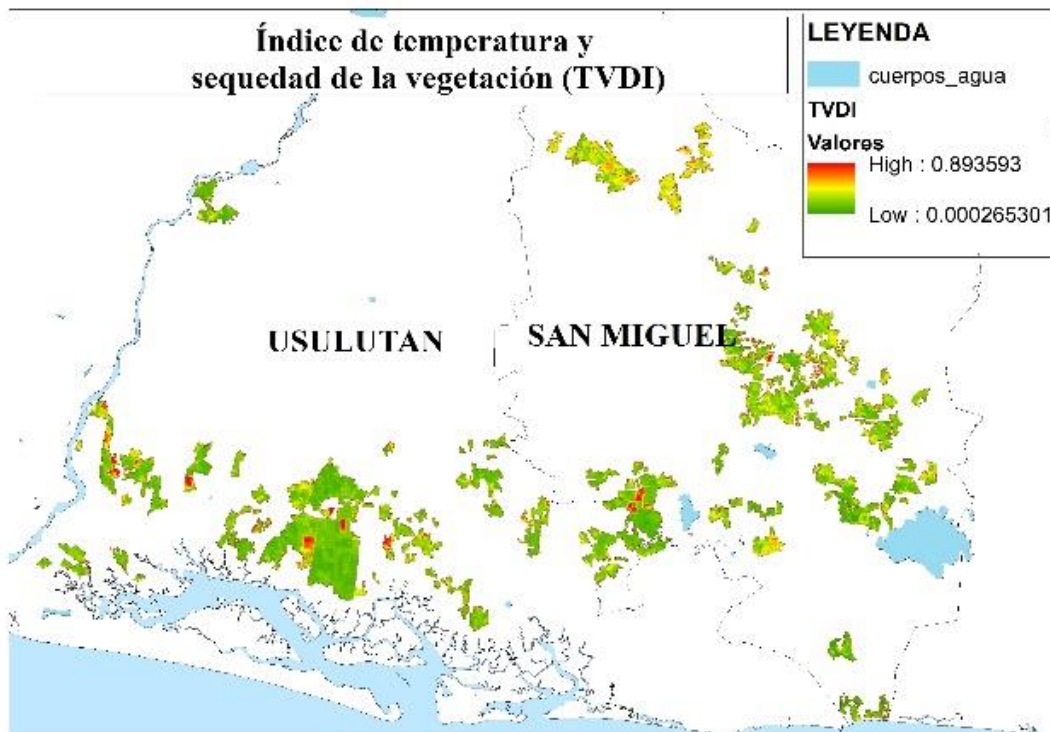


Figura 28. Mapa de TVDI, 23 de noviembre del 2014.

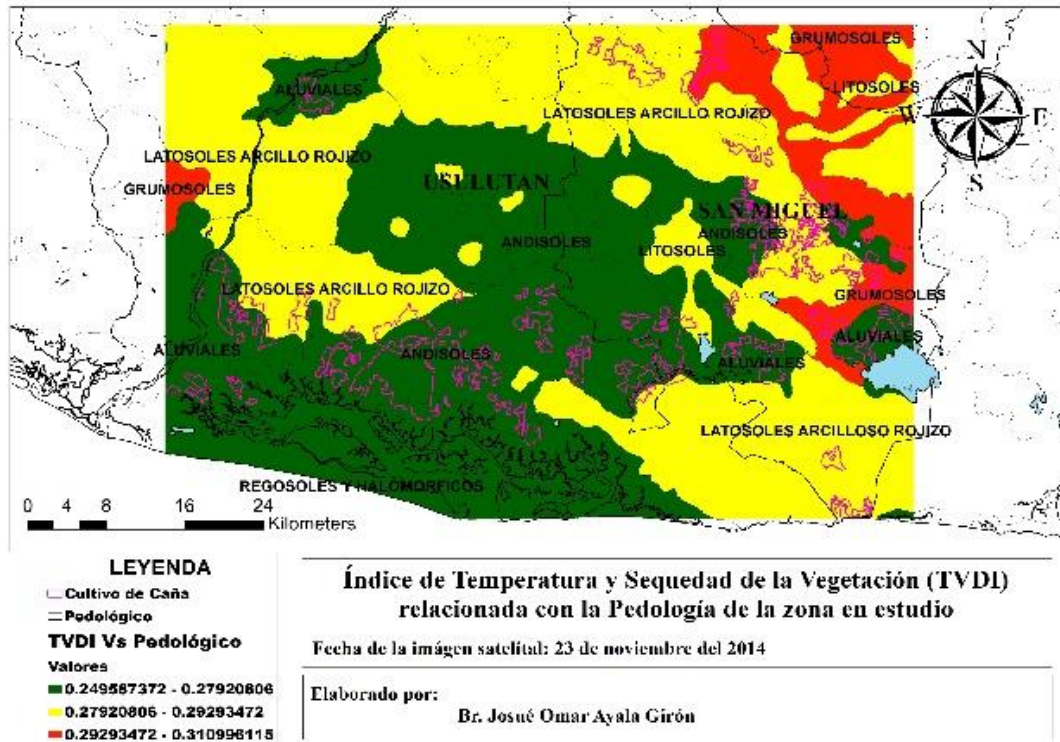


Figura 29. TVDI y su relación con la pedología, 23 de noviembre del 2014.

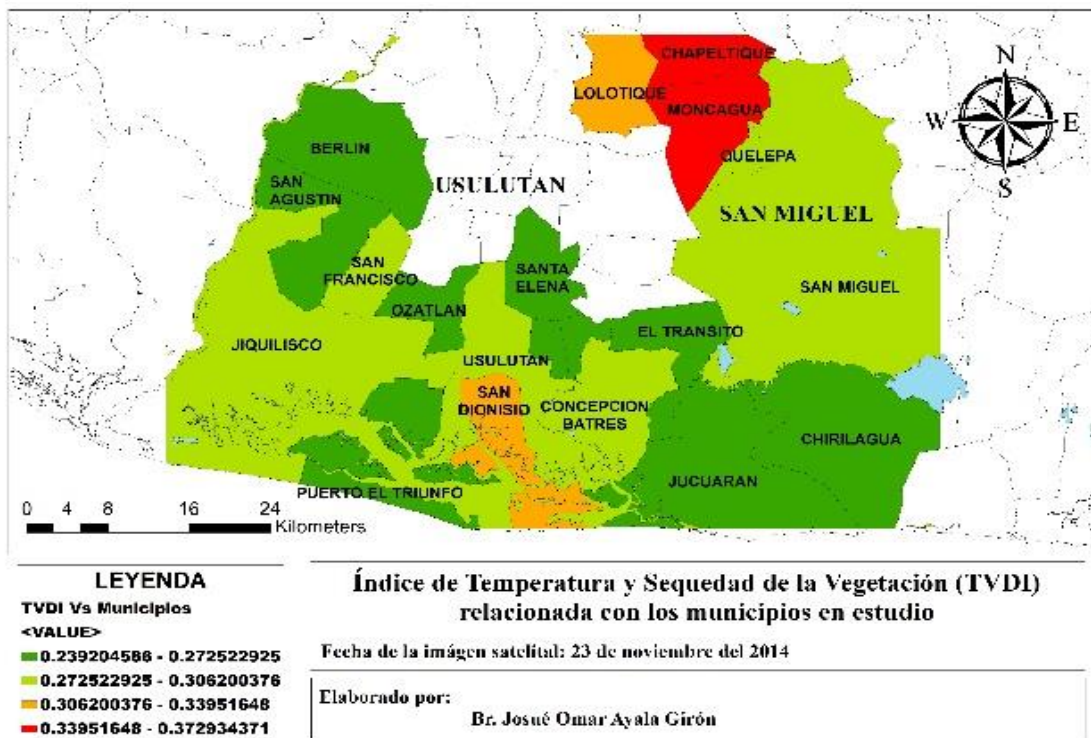


Figura 30. TVDI y su relación con los municipios, 23 de noviembre del 2014.

Para el mes de noviembre del 2014, se tiene menor impacto por el estrés hídrico debido a la temperatura de ambiente en esos momentos, así como a que durante estos meses los cañales tienen su macollaje cerrado, lo cual no permite que se evapore el agua de los suelos, al evitar esto las plantas tienen disponible su recurso hídrico sobrellevando de esta manera los efectos del estrés hídrico. Los suelos más afectados por el estrés hídrico en la zona de estudio fueron los Grumosoles manteniéndose en el rango de suelos altamente húmedos de acuerdo con López Beltrán *et al.* 2016. al igual que los Latosoles Arcillosos Rojizos y los Litosoles, esto debido a las características de estos suelos que tienden a ser más susceptibles en temporadas de sequía.

El departamento que muestra un poco más de afectación en cuanto al estrés hídrico fue San Miguel exactamente en el municipio de Moncagua.

4.5. Imágenes satelitales de TVDI con su relación a la pedología y su efecto en los municipios de la zona en estudio para el año 2015

4.5.1. Imágenes satelitales capturadas el 10 de enero del 2015

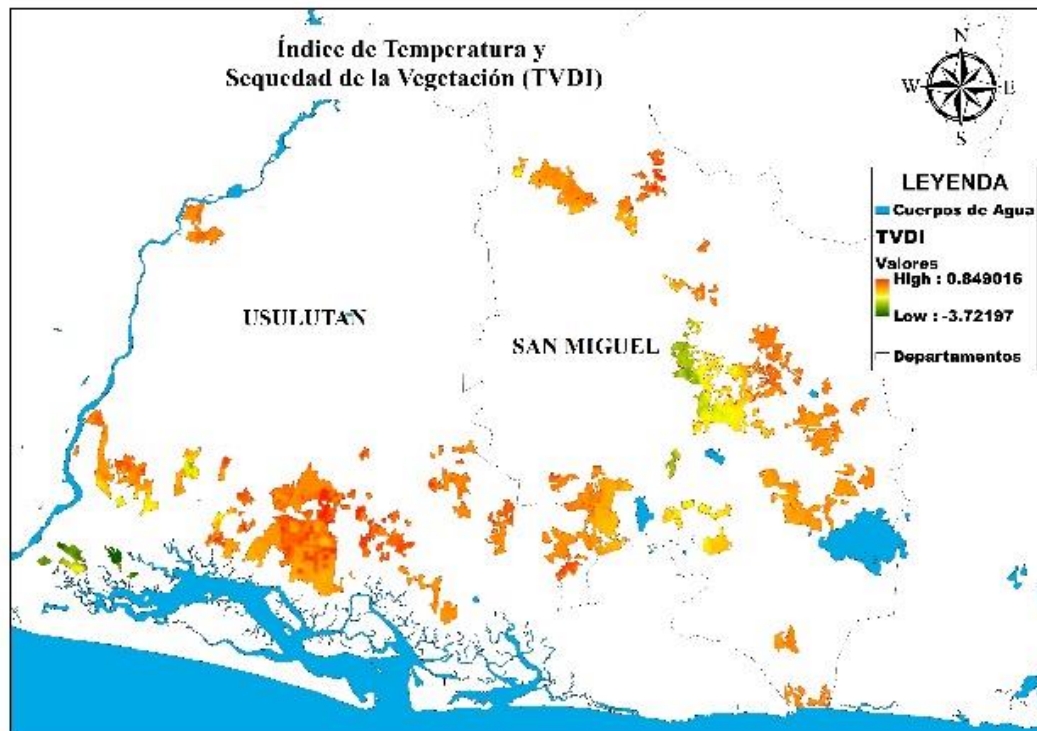


Figura 31. Mapa de TVDI, 10 de enero del 2015.

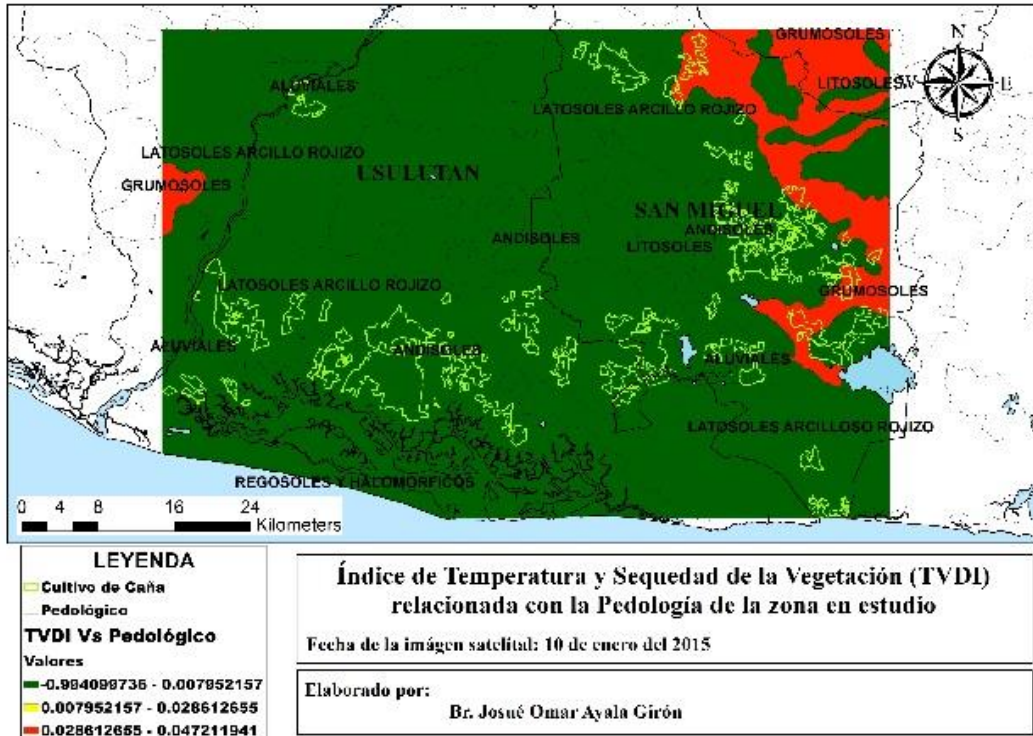


Figura 33. TVDI y su relación con la pedología, 10 de enero del 2015.

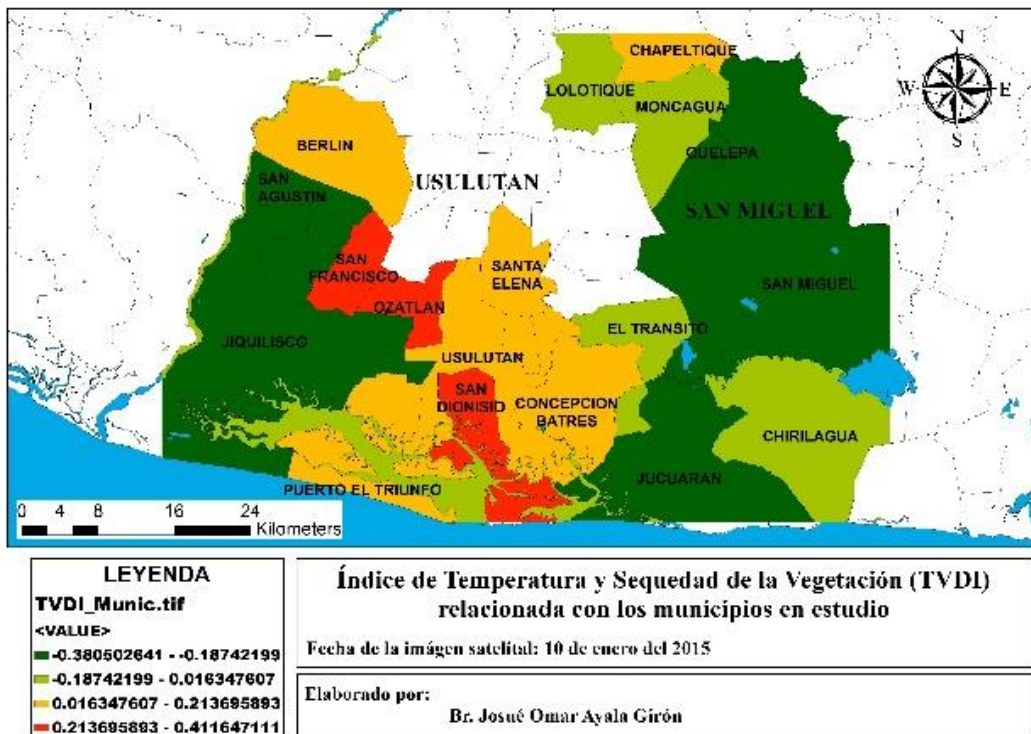


Figura 32. TVDI y su relación con los municipios, 10 de enero del 2015.

Durante el mes de enero del 2015, el tipo de suelo más afectado fueron los suelos Grumosoles, ya que para el mes de enero los suelos no poseen agua en sus estructuras por ser la época seca en la región, estos suelos durante la época seca suelen ser duros y se rajan debido a que poco profundos y son poco permeables durante la época lluviosa de acuerdo con Sotelo *et al.* 2008.

El municipio más afectado por el estrés hídrico en el mes de enero fue el municipio de San Dionisio en el departamento de Usulután

4.5.2. Imágenes satelitales capturada el 31 de marzo del 2015

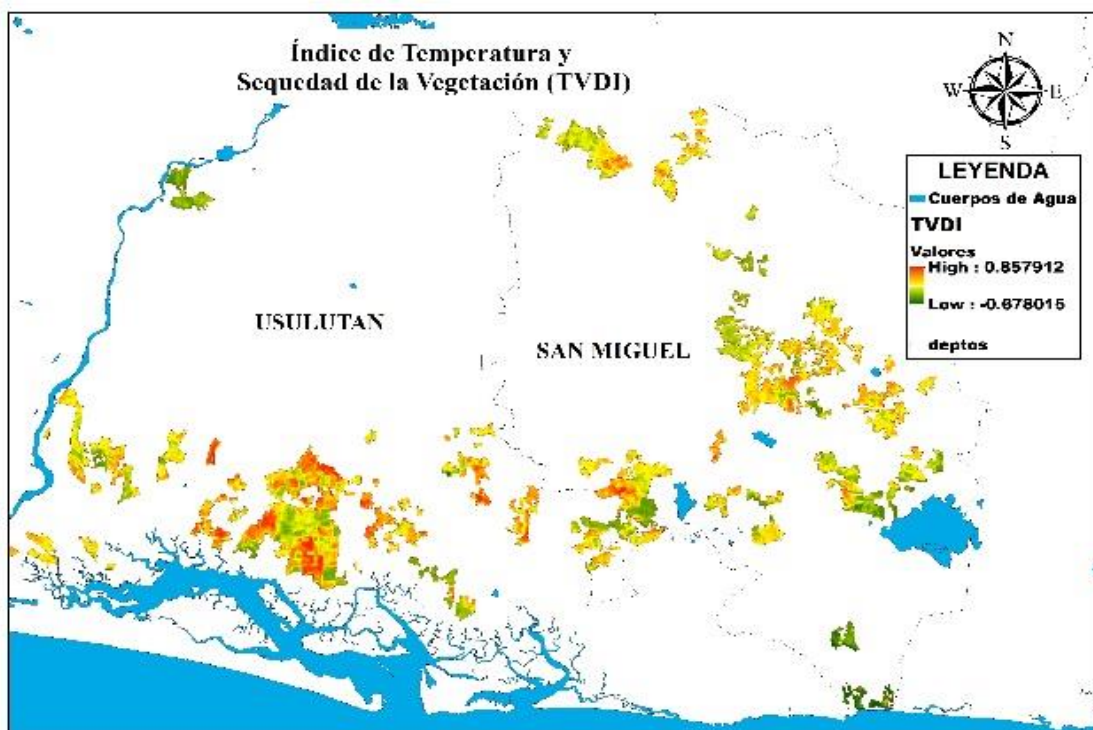


Figura 34. Mapa de TVDI, 31 de marzo del 2015.

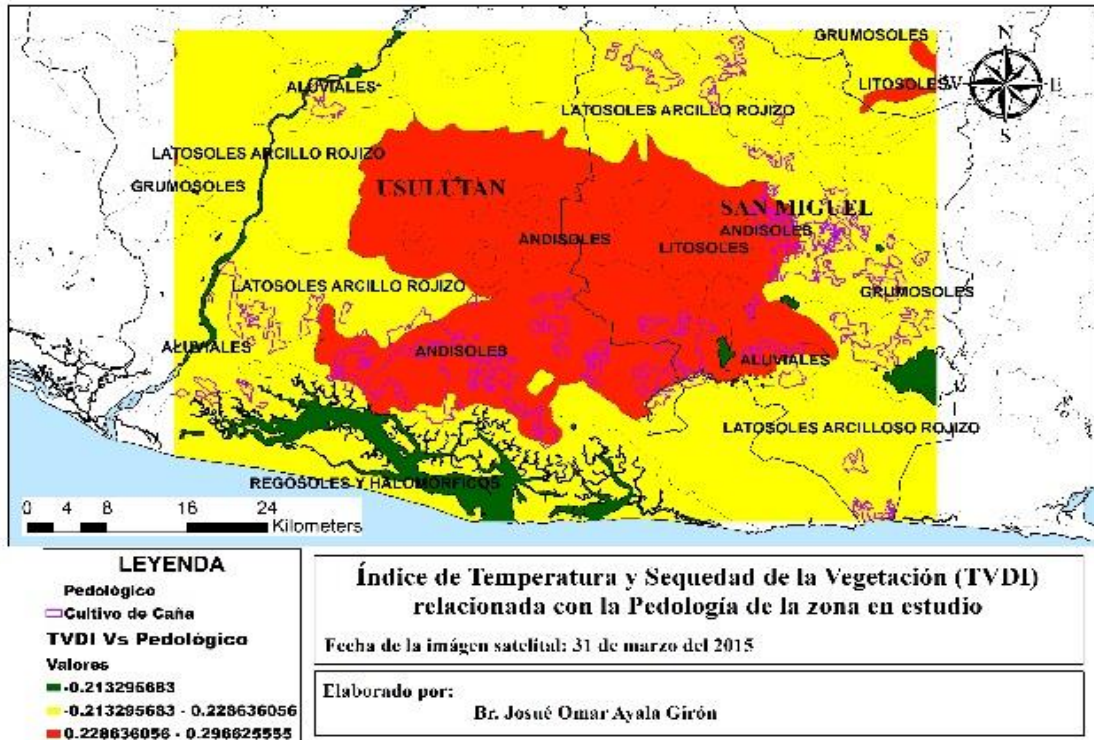


Figura 35. TVDI y su relación con la pedología. 31 de marzo del 2015.



Figura 36. TVDI y su relación con los municipios, 31 de marzo del 2015.

Durante el mes de marzo en El Salvador se registran las temperaturas las altas, ya que este mes es parte de la temporada seca de la región del trópico. Así mismo las plantas de caña de azúcar se encuentran en la fase de macollaje, son plantas jóvenes y susceptibles al estrés hídrico.

Durante la captura de la presente imagen satelital se observa que las plantas más afectadas fueron las cultivadas en los suelos Andisoles y Litosoles y en menor proporción en los Latosoles Arcilloso Rojizo aluviales y Grumosoles.

Los municipios más afectados por este fenómeno fueron: Jiquilisco, San Dionisio, Usulután, Concepción Batres del Departamento de Usulután y Moncagua del departamento de San Miguel.

4.5.3. Imágenes satelitales capturada el 06 de agosto del 2015

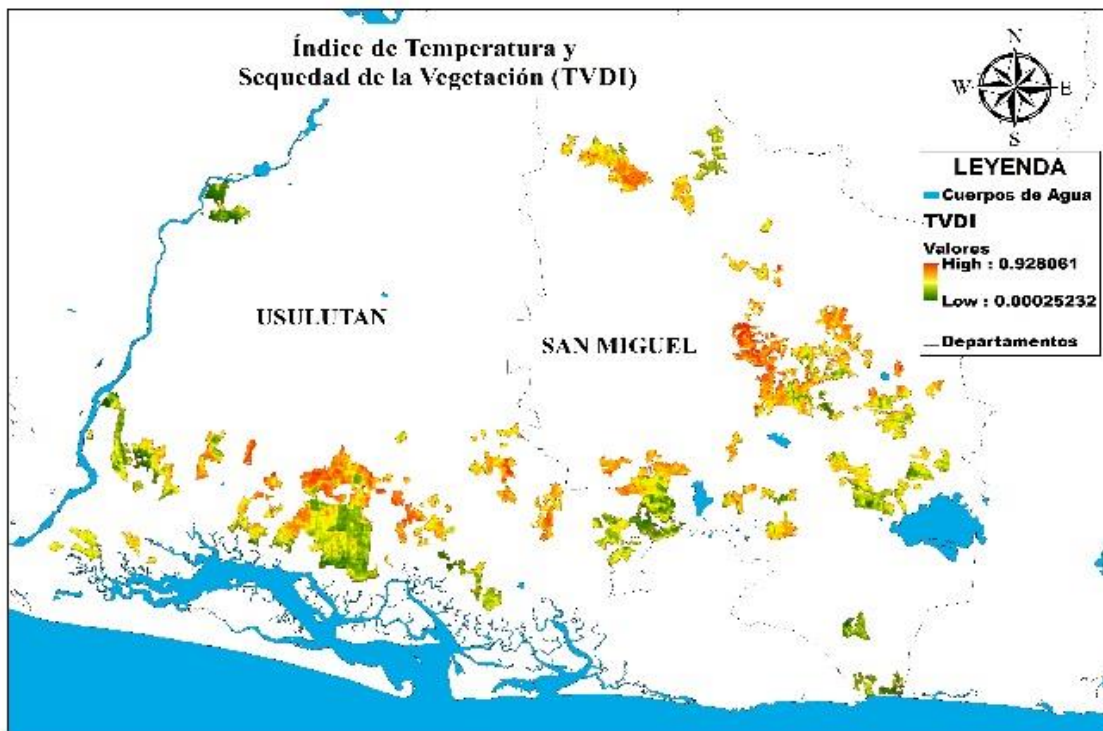


Figura 37. Mapa de TVDI, 06 de agosto del 2015.

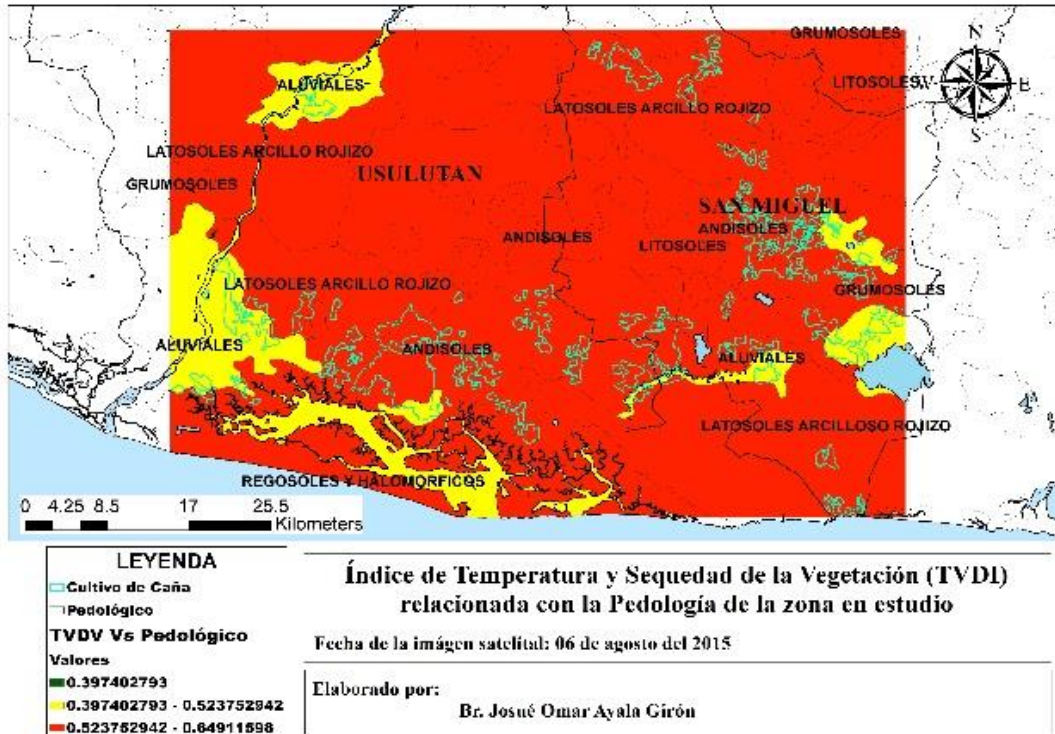


Figura 39. TVDI y su relación con la pedología, 06 de agosto del 2015.

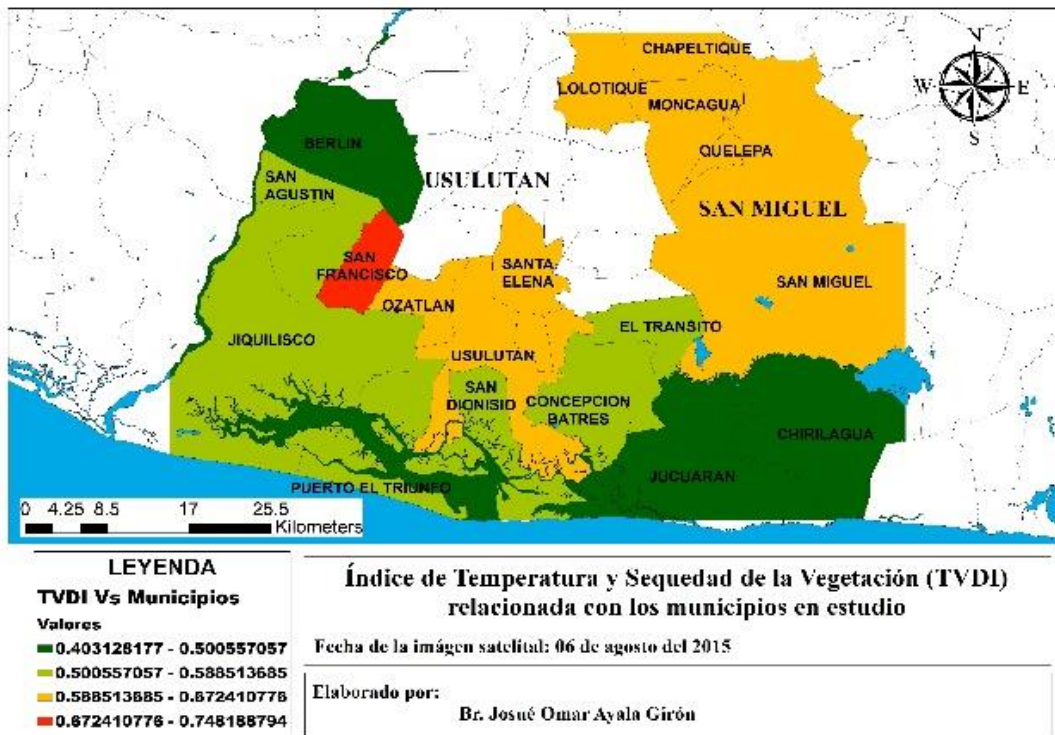


Figura 38. TVDI y su relación con los municipios, 06 de agosto del 2015.

Durante el mes de agosto generalmente en el salvador ya se está en la temporada lluviosa, por lo que durante esta captura de imagen satelital el estrés hídrico debería de ser es bajo. Durante el año 2015 en este mes se sufrió una sequía, generando estrés hídrico en las plantas de caña de azúcar y como se puede observar en la imagen satelital de la pedología, las plantas menos afectadas por el estrés hídrico fueron aquellas que fueron cultivadas en las cercanías de cuerpos de agua, aquellas plantas cultivadas en suelos alejados de cuerpos de agua fue mayor el valor de TVDI, los rangos de mayor afectación fueron entre 0.52 y los 0.64; clasificándose como medianamente húmedo y bajamente húmedo de acuerdo con López Beltrán *et al.* 2016.

Los municipios más afectados donde se cultiva caña fueron Usulután del Departamento de Usulután y del departamento de San Miguel fueron los municipios de San Miguel, Quelapa, Moncagua, Lolotique y Chapeltique.

4.5.4. Imágenes satelitales capturada el 26 de noviembre del 2015.

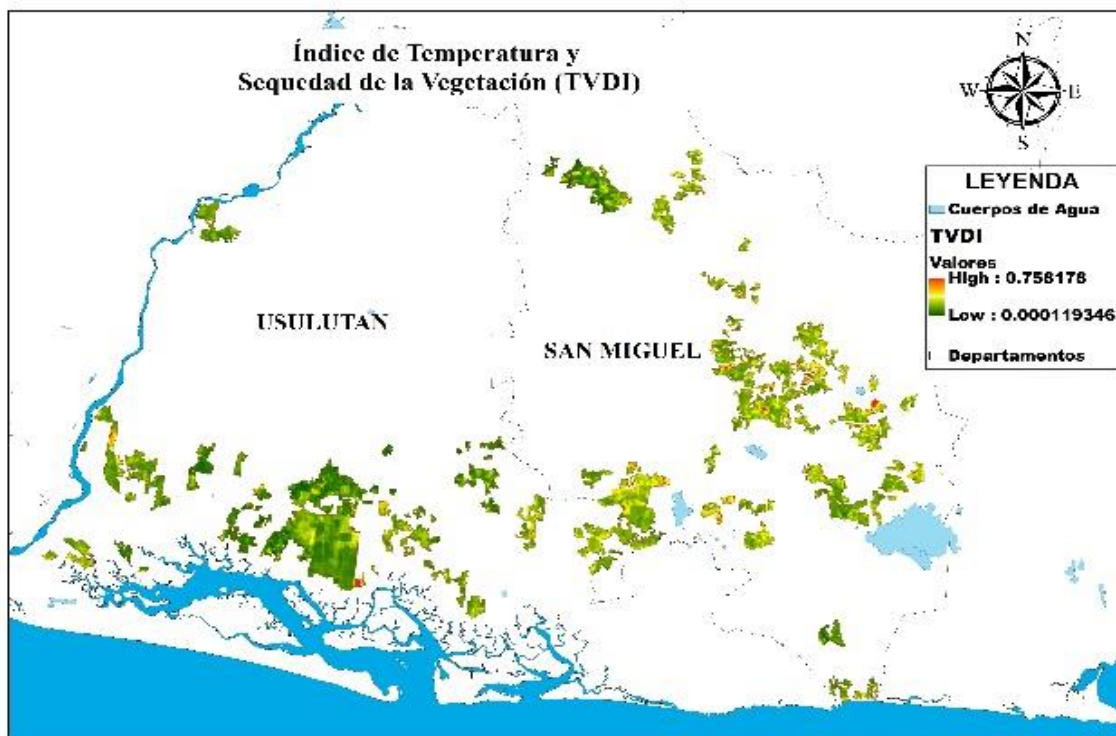


Figura 40. Mapa de TVDI, 26 de noviembre del 2015.

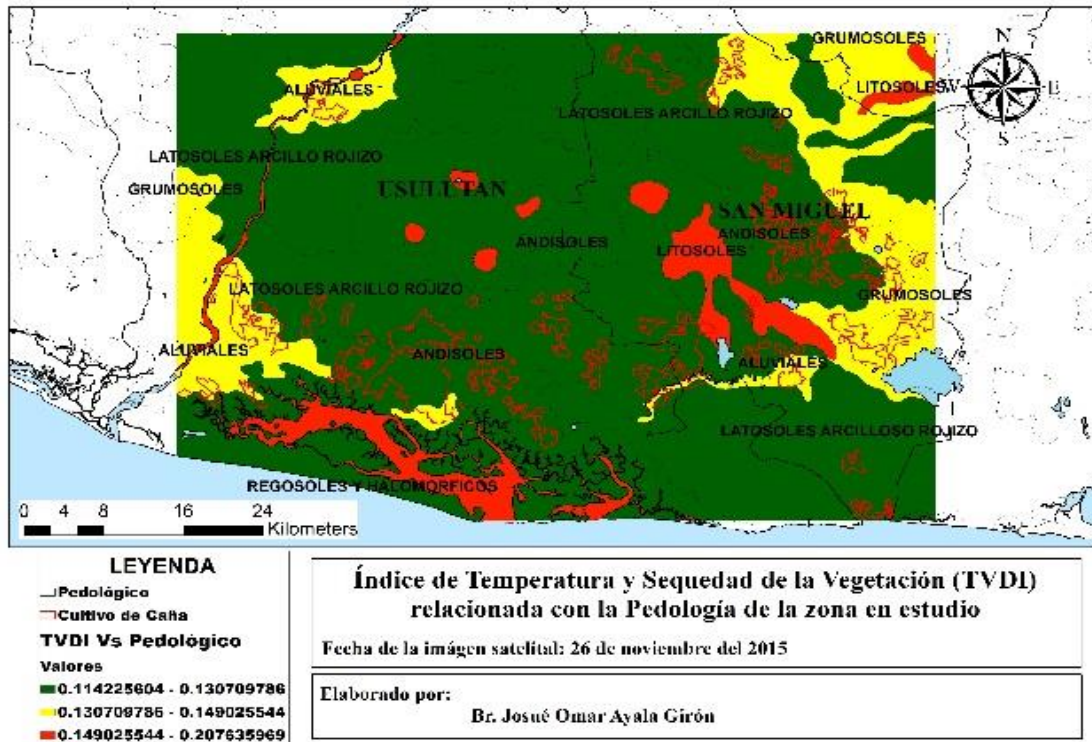


Figura 41. TVDI y su relación con la pedología, 26 de noviembre del 2015.



Figura 42. TVDI y su relación con los municipios, 26 de noviembre del 2015.

Como se observa en el mapa de TVDI (Figura 40) este se observa que aquellas plantas que fueron cultivadas en lugares cercanos a los cuerpos de agua sufren menor estrés hídrico pero aquellas plantas alejadas de estos registran mayores valores en TVDI, por lo que el municipio más afectado es San Miguel, ya que no posee cuerpos de agua. Para esta fecha en estudio, los suelos que mostraron mayores niveles de TVDI fueron los Litosoles, Aluviales y Grumosoles, por lo que según López Beltrán *et al.* 2016. Con estos valores se pueden clasificar en altamente húmedos.

Los municipios más afectados fueron Usulután, San Dionisio y Concepción Batres del departamento de Usulután y del Departamento de San Miguel fueron Chirilagua, San Miguel, Quelapa, Moncagua y Chapelrique.

4.6. Historial climático de la Zona en Estudio

4.6.1. Precipitación en la zona de estudio desde el año 2010 hasta el 2019

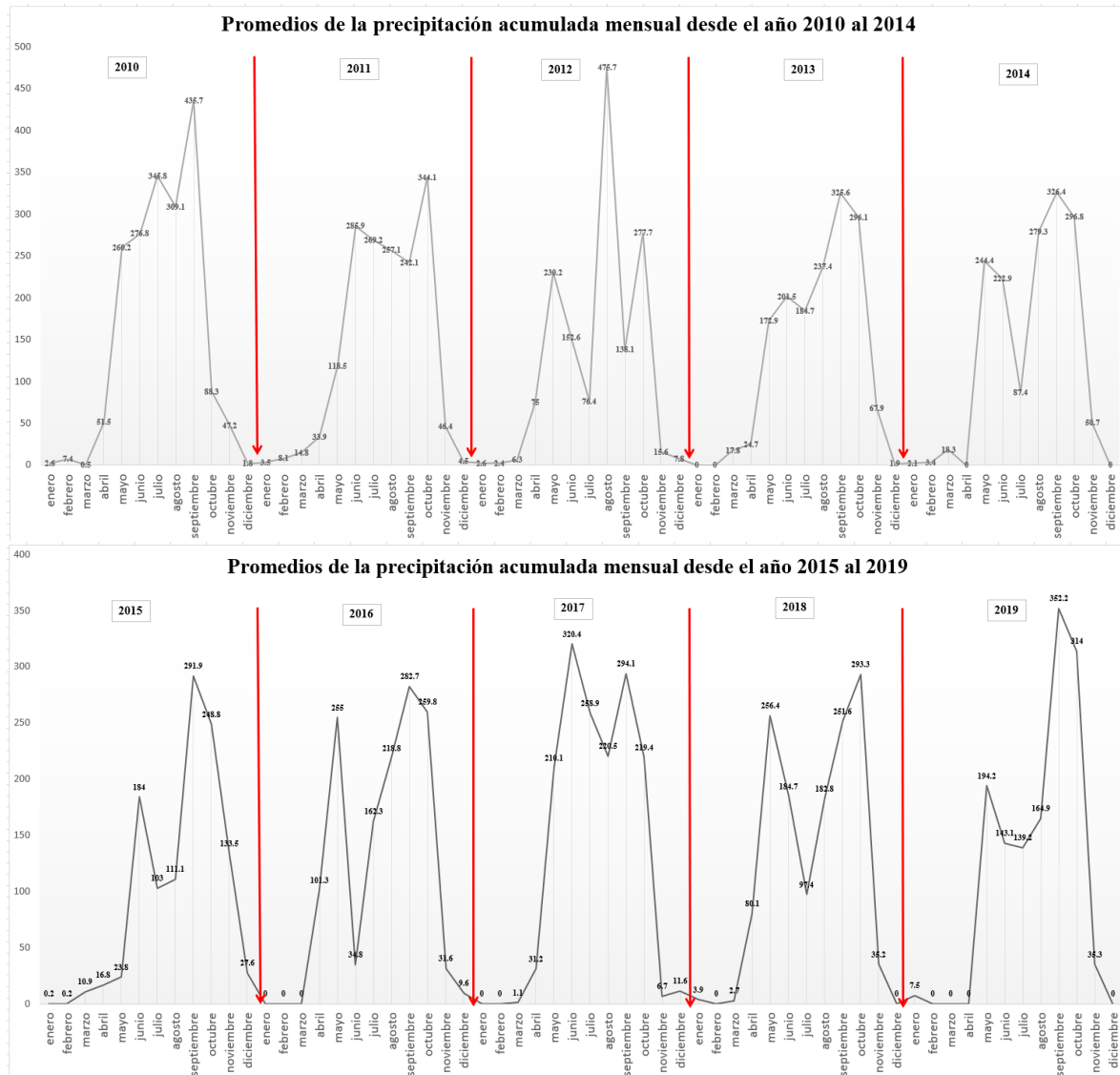


Gráfico 6. Precipitación Acumulada de los años 2010 al 2019.

De acuerdo con el gráfico 6 histórico de la precipitación hasta el año 2019, se puede observar que desde el año 2011 se iniciaron a mostrar anomalías en la precipitación por lo que se inició a observar sus efectos en la precipitación (Medina 2010). Por lo que se comprueba que la mayor afectación según informo la MCCES (2018) fue entre los años 2012 y 2016, entre los cuales se tuvo un déficit de ligero a extremo en la zona oriental del país. Para el año 2015 se observó una tendencia de reducción en la lluvia acumulada.

4.6.2. Temperatura en la zona de estudio desde el año 2010 hasta el 2019

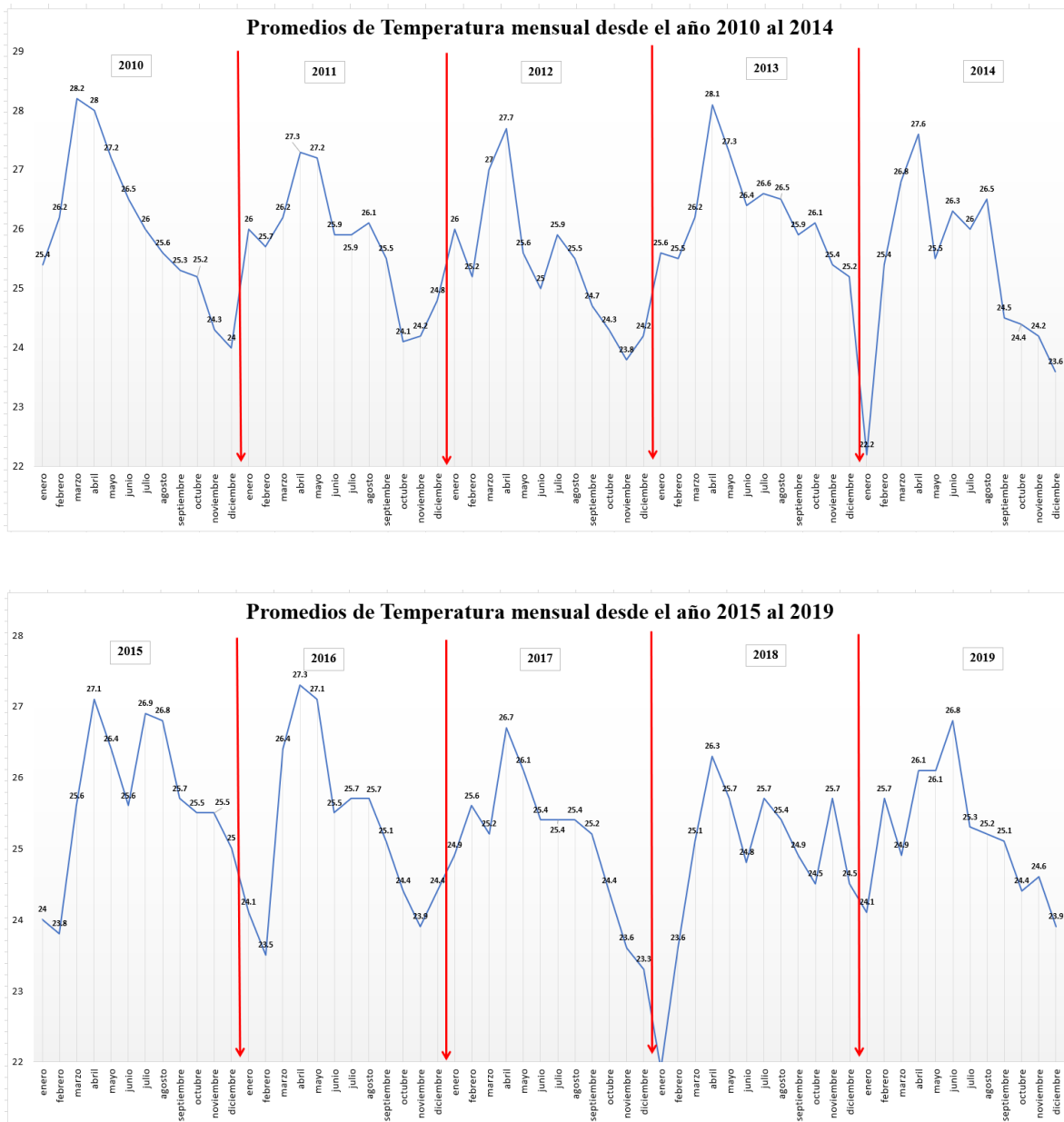


Gráfico 7. Temperatura en la zona de estudio del año 2010 al 2019.

En el Grafico se identificó el comportamiento de la temperatura durante los últimos años en los que se observa anomalías en la temperatura, desde el año 2011 hasta el año 2018, teniendo picos altos y bajos, sin mantenerse uniforme en los años; mostrando la mayor variabilidad en la temperatura entre los años 2012 al 2015.

Es importante mencionar que debido a la forma de obtención de estos datos se puede tener una aproximación, pero no es la estimación verdadera de los parámetros.

4.7. Comportamiento del TVDI en relación con los datos climáticos de la zona en estudio

4.7.1. Comportamiento del TVDI con la Precipitación de los años 2014 y 2015

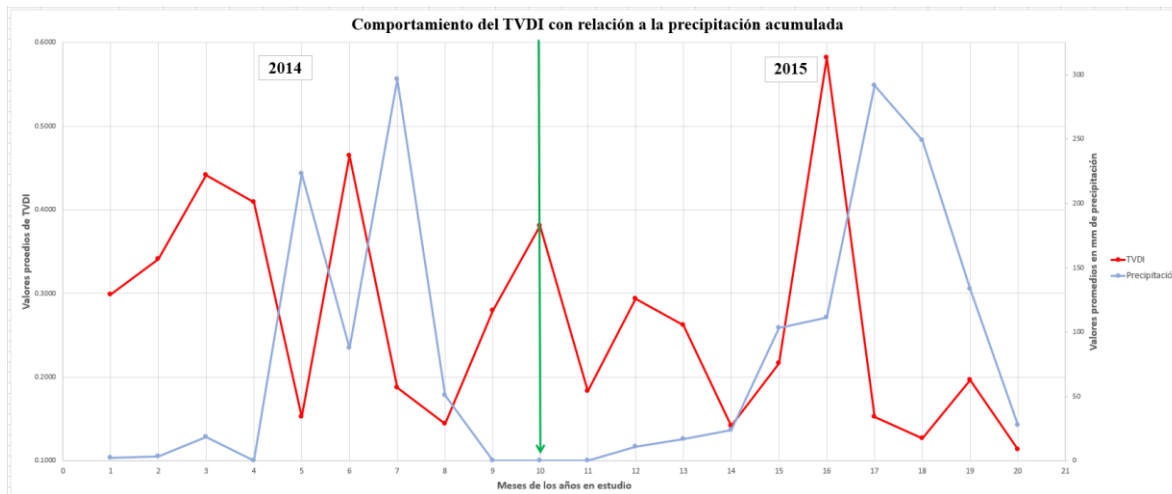


Gráfico 8. Comportamiento del TVDI del año 2014 y 2015.

Como se observa en el Gráfico 8 los valores de TVDI se comportan de forma inversamente proporcional a los datos de la precipitación acumulada, por lo que se puede interpretar que, a mayor cantidad de precipitación acumulada durante un periodo determinado, menor será el valor de TVDI en las plantas de caña de azúcar.

A menor cantidad de precipitación acumulada en un periodo de tiempo determinado, el TVDI será mayor, es decir que el estrés hídrico en las plantas en estudio será mayor.

Es importante mencionar que se pueden tener sesgos en la evaluación del estrés hídrico, ya que la información satelital no es exacta.

4.7.2. Comportamiento del TVDI con la Temperatura de los años 2014 y 2015

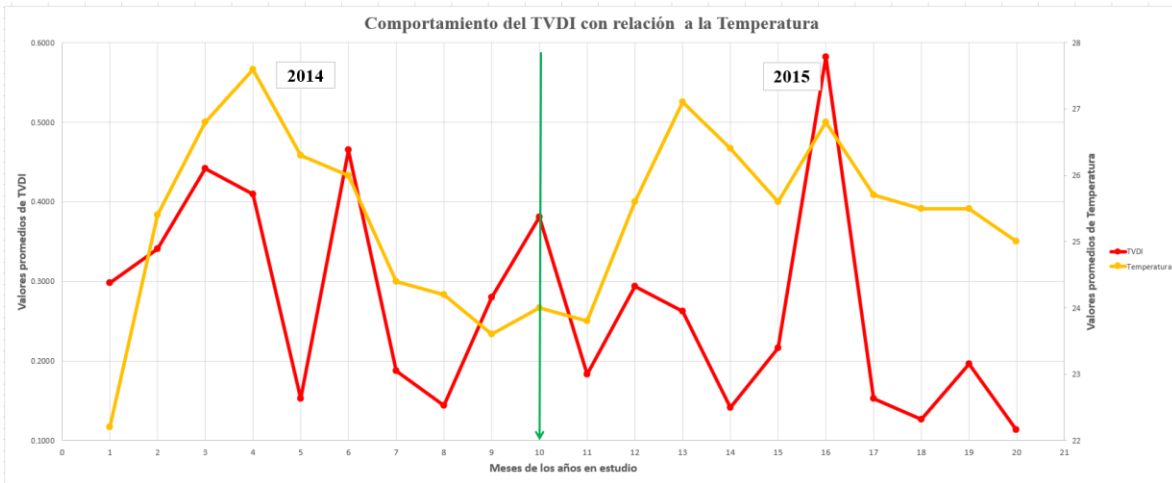


Gráfico 9. Comportamiento del TVDI del año 2014 y 2015.

La temperatura de la zona en estudio no se comporta de forma directamente proporcional ni indirectamente proporcional, por lo que se observa en el gráfico 9, sin embargo, es evidente que la temperatura influye en la evapotranspiración de las plantas lo cual genera mayor estrés hídrico dentro de las plantas.

La temperatura juega un papel importante en la evaluación del Estrés Hídrico en las plantas, es por ello por lo que en la fórmula propuesta por Sandholt *et al.* (2002) se toma las temperaturas y se interpretan en el diagrama de dispersión en el cual se determina el límite seco de las plantas en estudio.

5. CONCLUSIONES

El NDVI estimado para las etapas de brotación, macollaje (enero-mayo), de la caña en la zona, mostró un valor muy bajo con un promedio de 0.228, sin embargo, puede deberse a que, en estas etapas el cultivo aún se encuentra en baja densidad de acuerdo con su fenología y la imagen toma en cuenta la reflectancia del suelo.

El NDVI en la etapa de gran crecimiento (mayo-agosto) del cultivo tuvo valor promedio de 0.2580, aún se consideran bajos (plantas enfermas), puede atribuirse al estrés acumulado del cultivo ocasionado por el irregular régimen de lluvia y altas temperaturas durante los primeros meses del año, igual comportamiento en 2014 y 2015, que, aunque se nota una evolución positiva, la plantación no llegó a mostrar valores óptimos de NDVI.

El comportamiento del TVDI se expresó directamente proporcional a la temperatura, e inversamente proporcional al NDVI a la lluvia, a excepción de aquellas zonas cultivadas cercanas a fuentes de agua, donde el cultivo no sufrió de daños severos.

La precipitación del mes de marzo de 2014 fue superior al promedio mensual de ese mes, sin embargo, las temperaturas también fueron altas, por tal razón hubo un incremento del TVDI en ese mes, posiblemente iniciándose en ese momento la etapa de estrés del cultivo, coincidiendo con valores bajos de NDVI.

El histórico de la precipitación acumulada mensual, demostró que desde el 2011 se presentaron anomalías negativas (periodos de sequía, lluvias intermitentes y poca precipitación acumulada por año), en la lluvia de la zona en estudio, mostrando mayor afectación durante los años del 2012 al 2016, periodo en el cual se tuvo un déficit de precipitación acumulada de 272.22 mm en la Zona Oriental, por lo cual el cultivo estuvo expuesto sequías en estos años, con mayor severidad en 2014 y 2015.

Los valores de TVDI se comportan de manera inversamente proporcional a la precipitación acumulada y al NDVI, por lo que se evalúa que, a mayor precipitación, menor es el estrés hídrico en las plantas de caña de azúcar.

Los municipios en donde se cultiva la caña de azúcar que resultaron más afectados por sequía de acuerdo con el análisis espacial (procesamiento de imágenes térmicas) fueron Concepción Batres, San Dionisio y Jiquilisco del departamento de Usulután; del departamento de San Miguel los municipios más afectados fueron San Miguel, Moncagua y El Tránsito, siendo estos municipios los más susceptibles a efectos adversos por sequía.

6. RECOMENDACIONES

Mantener un constante monitoreo de la precipitación y temperatura en la zona de estudio para observar las tendencias y tomar decisiones de tipo mitigadoras para reducir las consecuencias de las sequías en estas zonas cañeras.

Los municipios de Concepción Batres, San Dionisio y Jiquilisco del departamento de Usulután; del departamento de San Miguel los municipios San Miguel, Moncagua y El Tránsito, deben tener medidas de mitigación a las sequías en estas zonas susceptibles. Aplicando alternativas de mejor manejo del cultivo de caña de azúcar mediante prácticas de conservación de suelos y agua con abonos verdes, implementación de sistemas de riego y el uso de polímeros retenedores de humedad.

Se podrían continuar los estudios con otros tipos de plantas, ya sean estas del rubro agrícola como las del sector forestal, en mucha literatura se encuentran estudios realizados a plantas forestales con enfoques de cuencas hidrográficas.

Para el estudio de TVDI con imágenes satelitales es fundamental el uso de imágenes que posean la menor cantidad de nubes en su captura y evitar muestrear suelos desnudos o superficies que no estén relacionadas al estudio, ya que estas influyen en la determinación del TVDI brindando datos que podrían sesgar el estudio.

7. BIBLIOGRAFÍA

Aguilar Rivera, N. 2009. Ficha técnica del cultivo de caña de azúcar. Veracruz y San Luis Potosí, México. 20 p.

Aguilar-Rivera, N; Algara Siller, M; Olvera Vargas, LA. 2015. Gestión del agua como factor limitante de productividad cañera en México. *Revista de Geografía Norte Grande*, (60), 135-152.

Aguilar, CG. 2015. Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. *CEDAMAZ* 5(1):30-41.

Alfaro, E; Amador, JA. 1996. El Niño-Oscilación del Sur y algunas series de temperatura máxima y brillo solar en Costa Rica. *Tópicos meteorológicos y oceanográficos*, 3(1), 19-26.

Bautista, F; Palma López, D; Huchin Malta, W. 2005. Actualización de la clasificación de los suelos del estado de Yucatán. *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales*, 105-122.

Beekman, GB. 2005. Programa de combate a la desertificación y mitigación de los efectos de la sequía en América del sur, BID-IICA. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). p. 21-35.

Bravo Morales, NF. 2017. Teledetección espacial. Landsat, Sentinel-2, Aster L1T y Modis. *Geomática Ambiental S.R.L. Perú*. 105 p.

Calvo Solano, O. D; Quesada Hernández, L; Hidalgo, H; Gotlieb, Y. 2018. Impactos de las sequías en el sector agropecuario del Corredor Seco Centroamericano. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 695-709.

CAMAGRO (Cámara Agropecuaria y Agroindustrial de El Salvador). 2016. Guía técnica Caña de Azúcar. San Salvador, El Salvador. 35 p.

Camarillo Naranjo, J.M; Álvarez Francoso, J.I; Limones Rodríguez, N; Pita López, M.F; Aguilar Alba, M. 2019. El Sistema Global de Monitoreo del Clima: del manejo de datos climáticos a la difusión del conocimiento (en línea). Consultado 11 sep. 2021. Disponible en <https://www.tandfonline.com/eprint/efGemz2In95yFJ6Czeuq/full>

Chuvieco, E. 1985. Aportaciones de la Teledetección espacial a la cartografía de ocupación del suelo. In *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* 5:29-48.

Chuvieco, E. 1995. Fundamentos de teledetección espacial 2 ed. Ediciones RIALP, S.A. Madrid. España. 449 p.

CONADESUCA (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, México). 2015. Ficha técnica del cultivo de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum* L.). México. 19 p.

Congedo, L. 2016. Semi-automatic classification plugin documentation. Release, 4(0.1), 29.

CONSAA (Consejo Salvadoreño de la Agroindustria Azucarera). 2016. Zonas Productoras de Caña de Azúcar en El Salvador (en línea). Consultado 12 feb. 2020. Disponible en <https://www.consaa.gob.sv/zonas-productoras-de-cana-de-azucar-en-el-salvador/>

Coronel, A. 2013. Sequía: concepto e índices de monitoreo. Propuesta de un nuevo índice. Revista Agromensajes 37(1):1-3.

Díaz Ayala, PS; Gracias Serrano, FE; Romero Huevo, CM. 2004. Caracterización del cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en El Salvador. Tesis Ing. Agr. San Salvador, El Salvador. Universidad de El Salvador. 105 p.

Díaz Montejo, LL; Portocarrero Rivera, ET. 2002. Manual de producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). Tesis Ing. Agr. Francisco Morazán, Honduras, Universidad Zamorano. 148 p.

Duarte Álvarez, OJ; González Villalba, JD. 2019. Guía Técnica Cultivo de Caña de Azúcar. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay. 40 p.

EOS (Earth Observing System, Estados Unidos de Norte América). 2020. Agricultura. NDVI: Preguntas frecuentes y que necesitas saber (en línea). Consultado 20 feb. 2021. Disponible en <https://eos.com/es/blog/ndvi-preguntas-frecuentes/>

Escalante, C; Reyes, L. 1998. Identificación y análisis de sequías en la región hidrológica número 10, Sinaloa. Ingeniería Hidráulica en México 8(2):23-43.

Esperanza, F; 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, Argentina. 10 p.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Panamá). 2016. Programa de fortalecimiento de la resiliencia ante el riesgo de desastres en el Corredor Seco Centroamericano. El Salvador-Guatemala-Honduras-Nicaragua. 10 p.

Fernández, W; Ramírez, P. 1991. El Niño, la Oscilación del Sur y sus efectos en Costa Rica: una revisión. *Tecnología en Marcha*, 11(1), 3-10.

García de Pedraza, L. 1982. La sequía: aspectos agrometeorológicos. *Revista tiempo y clima* 3(1):63-71.

Hernández Martínez, MA. 2019. *Sistemas de Información Geográficas: Conceptos básicos, ejercicios prácticos y usos en las Ciencias Agronómicas*. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador. 156 p.

Holzman, M; Rivas, R; Piccolo, MC. 2012. Utilización de imágenes de temperatura radiativa e índice de vegetación mejorado para el estudio de las condiciones hídricas en la región pampeana. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, Buenos Aires, Argentina (28):25-33.

Hughes, TR; Acosta, JR; Lochhead, J. 2016. *Producción a Gran Escala de Caña de Azúcar en El Salvador*. Movimiento de Agricultura Orgánica de El Salvador. 32 p.

Ingenio La Cabaña 1999. *Guía Técnica del cultivo de la caña de Azúcar (Saccharum officinarum L.)*. San Salvador, El Salvador. 24 p.

Lacruz, JL. 2012. *Las sequías hidrológicas en la Península Ibérica: Análisis y caracterización espacio temporal, influencias climáticas y el efecto de la gestión hidrológica en un contexto de cambio global*. Tesis Ph. D. Zaragoza, España. Universidad de Zaragoza. 215 p.

Lagos, JA. 1986. *Compendio de Botánica Sistemática* 2 ed. Dirección de Publicaciones e Impresos San Salvador, El Salvador. 267 p.

López Beltrán, MA; López Meza, M; Tirado Ramírez, MA. 2016. Ajuste de un modelo para estimar el contenido de humedad del suelo utilizando TVDI en el Estado de Sinaloa, México. *Adjusting a model to estimate the soils moisture content in Sinaloa State, México*. 22,25-36.

Mansilla, E. 2010. Elementos y patrones constitutivos del riesgo de sequía en América Central: La irregularidad y el acceso al suelo. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. ISDR. 37 p.

MCCES (Mesa de Cambio Climático de El Salvador). 2018. Pronunciamento de la mesa de cambio climático de El Salvador ante las políticas nacionales para el abordaje de las sequías y sus impactos en el entorno de cambio climático global. San Salvador, El Salvador. 4 p.

Medina, FJ. 2010. El Niño y la Oscilación del Sur. Oceanografía, Servicio Nacional de Estudios Territoriales. El Salvador. 10 p.

Medrano H; Flexas J. 2003. Respuesta de las plantas al estrés hídrico. In La ecofisiología vegetal: Una ciencia de síntesis. Thompson Editores, España: 253-285.

Meyrat, A; Poveda, C; Picado, L; Van der Zee Arias, A; Van der Zee, J. 2012. Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano. (Países CA-4) Tomo I. Tegucigalpa. Honduras. 90 p.

Mieres, AL; Campos, R; Oprandi, G; Colombo, F; Rotella, F; Parodi, MI; Gambaudo, AS. 2012. Diagnóstico y rehabilitación de suelos halomórficos. INTA, Ecos y Voces, 29(1):14-17.

Mikkelsen, CA; Sagua, M; Lima, L. 2014. El concepto corredor como aporte a la comprensión del territorio. Geografia em questão, 7(1): 203-222.

Monreal, TE. 2006. La gestión de las sequías en España. INGENIERÍA Y TERRITORIO. 74, 52-57.

Morales, A. (1991). Aspectos técnicos sobre cuarenta y cinco cultivos Agrícolas de Costa Rica. Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. Ministerio de Agricultura y ganadería. San José: CR. 571 p.

Moreno Ramón, H; Ibañez Asensio, S; Gisbert Blanquer, JM. 2011. ANDISOLES. Escuela Politécnica de Valencia. España. 7p

Núñez López, D; Muñoz-Robles, CA; Reyes-Gómez, VM; Velasco-Velasco, I; Gadsden-Esparza, H. 2007. Caracterización de la sequía a diversas escalas de tiempo en Chihuahua, México. Agrociencia, 41(3): 253-262.

Ortega Gaucin, D. 2012. Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación. Instituto Del Agua De Nuevo León, México. DR. 213 p.

Ortega Gaucin, D. 2013. Sequía: causas y efectos de un fenómeno global. Ciencia y Sociedad 16(61):8-15.

- Pabón de Lara, Á. 1998. Actualización de la clasificación de suelos de El Salvador con los Sistemas Soil Taxonomy, 1995 y FAO/UNESCO. El Salvador. 61 p.
- Pérez, C; Muñoz, AL. 2006. Teledetección: nociones y aplicaciones. Universidad de Salamanca. Ávila, España. 356 p.
- Rivas, R; Weinzettel, P; Usunoff, E. 2005. Resultados Preliminares de la estimación del estrés hídrico a partir de Temperatura de superficie y NDVI. In Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de Hidrología Subterránea-Relación aguas superficiales-aguas subterráneas, Buenos Aires, Argentina. 195-202 p.
- Rojas Cáceres, JM. 2017. Caracterización y evaluación del comportamiento espacial de las propiedades físicas y químicas de un suelo aluvial en una plantación de coco (cocos nucifera). 33-35 p.
- Romero, ER; Scandaliaris, J; Digonzelli, PA; Scandaliaris, J. 2009. Manual del Cañero: La Caña de Azúcar Características y Ecofisiología. Tucumán, Argentina. CDD. 248 p.
- Sandholt, I; Rasmussen, K; Andersen, J. 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. Remote Sensing of environment, 79(2-3): 213-224.
- Salisbury, FB; Ross CW. 2000. Fisiología de las plantas. Células: agua, soluciones y superficies. Ed. Paraninfo Thomson Learning, Madrid: 5-275.
- Sotelo, R; Gutiérrez, C; Cruz, B; Ortiz, S; Segura, C. 2008. Historia y desarrollo de la clasificación de vertisoles en el Sistema FAO y la taxonomía. Terra Latinoamericana, 26(4): 325-332.
- USAID (United States Agency for International Development). 2017. Riesgo de Cambio Climático en El Salvador: Perfil de riesgo de país. Hoja informativa 2017-1:1-3.
- USGS (United States Geological Survey, Estados Unidos de Norteamérica, El Salvador). 2019. Landsat 8 band designations (en Línea). Consultado 6 feb. 2020. Disponible en <https://www.usgs.gov/media/imagenes/landsat-8-band-designations>
- Valiente, ÓM. 2001. Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. Investigaciones geográficas. Departamento de Geografía y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Barcelona. Investigaciones Geográficas (26):59-80.

Valladares, F; Vilagrosa, A; Peñuelas, J; Ogaya, R; Camarero, JJ; Corcuera, L.; Gil-Pelegrín, E. 2004. Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. (2): 165-192.

Varela, SA. 2010. Aspectos básicos de la fisiología en respuesta a estrés y el clima Como condicionante del mismo en las plantas. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. *Comunicación Técnica (78):24*.

Velasco, I; Ochoa, L; Gutiérrez, C. 2005. Sequía, un problema de perspectiva y gestión. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. *Región y sociedad 17(34):35-71*.

Vila, HF. 2011. Regulación de la hidratación y la turgencia foliares por mecanismos evitadores del estrés, y resistencia a déficit hídrico en vid (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Cuyo). 220 p.

Vivanco, JC; Bojórquez, JI; Murray, RM; Nájera, O; Flores, F; Hernández, A. 2010. Características de los principales suelos de la cuenca del río Mololoa, Tepic, Nayarit, México. *Cultivos Tropicales*, 31(1):32-40.

8. ANEXOS

Cuadro A 1. Valores promedios de LST; año 2014.

Nº	Fecha del 2014	LST Promedio
1	23 de enero	31.28
2	24 de febrero	35.45
3	28 de marzo	39.56
4	13 de abril	42.16
5	02 de julio	16.36
6	18 de julio	30.69
7	06 de octubre	25.86
8	07 de noviembre	26.90
9	23 de noviembre	26.44
10	25 de diciembre	28.37

Cuadro A 2. Valores promedios de LST; año 2015.

Nº	Fecha del 2015	LST Promedio
1	10 de enero	30.82
2	15 de marzo	34.84
3	31 de marzo	35.39
4	05 de mayo	27.01
5	18 de mayo	32.58
6	06 de agosto	36.82
7	09 de octubre	22.39
8	26 de noviembre	26.32
9	12 de diciembre	26.85
10	28 de diciembre	32.32

Cuadro A 3. Valores promedios del TVDI; año 2014.

Nº	Fecha del 2014	TVDI Promedio
1	23 de enero	0.2983
2	24 de febrero	0.3412
3	28 de marzo	0.4417
4	13 de abril	0.4095
5	02 de julio	0.1525
6	18 de julio	0.4649
7	06 de octubre	0.1876
8	07 de noviembre	0.1438
9	23 de noviembre	0.2795
10	25 de diciembre	0.3812

Cuadro A 4. Valores promedios del TVDI; año 2015.

Nº	Fecha del 2015	TVDI Promedio
1	10 de enero	0.1835
2	15 de marzo	0.2937
3	31 de marzo	0.2623
4	05 de mayo	0.1417
5	18 de mayo	0.2165
6	06 de agosto	0.5819
7	09 de octubre	0.1525
8	26 de noviembre	0.1266
9	12 de diciembre	0.1966
10	28 de diciembre	0.1132

Figura A 1. Complementos de la imagen satelital del 23 de enero del 2014.

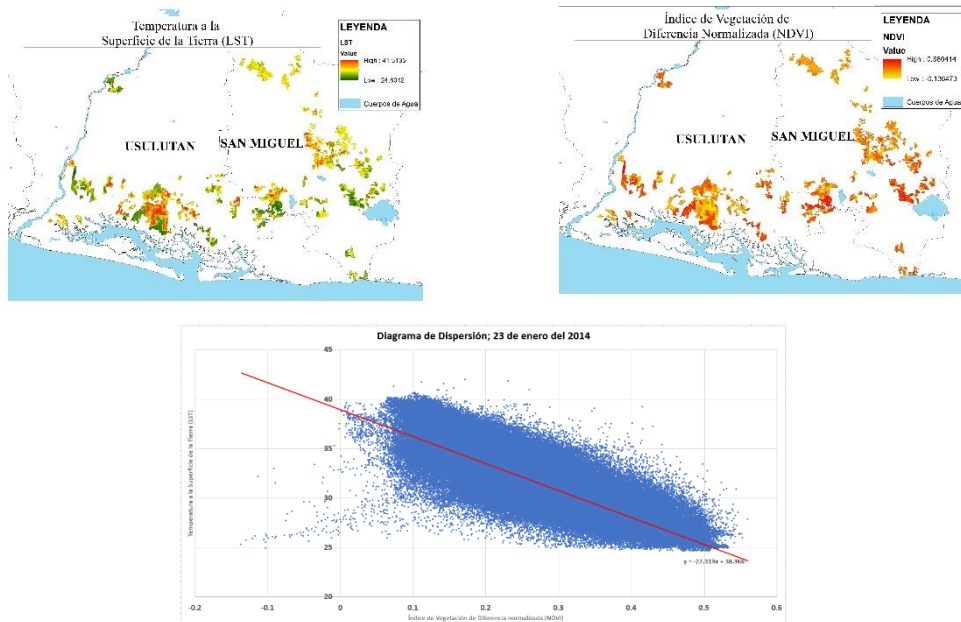


Figura A 2. Complementos de la imagen satelital del 24 de febrero del 2014.

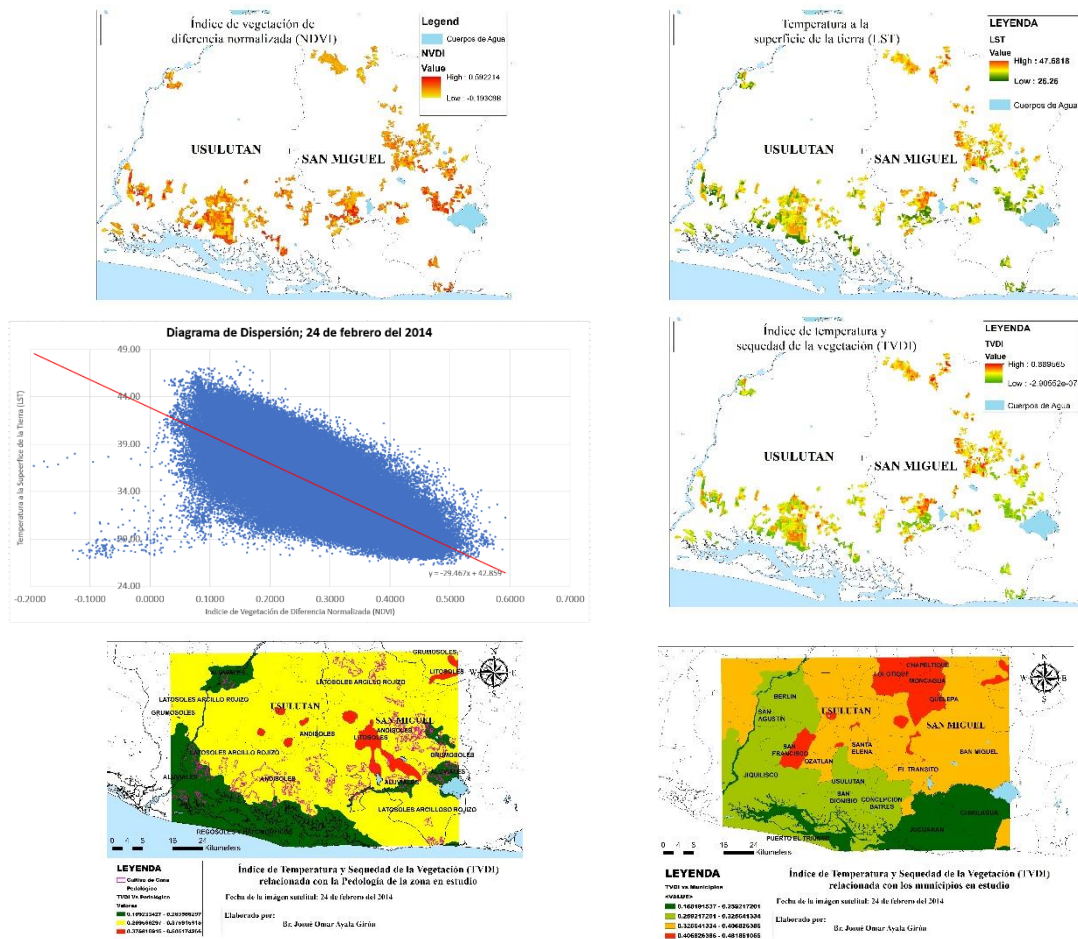
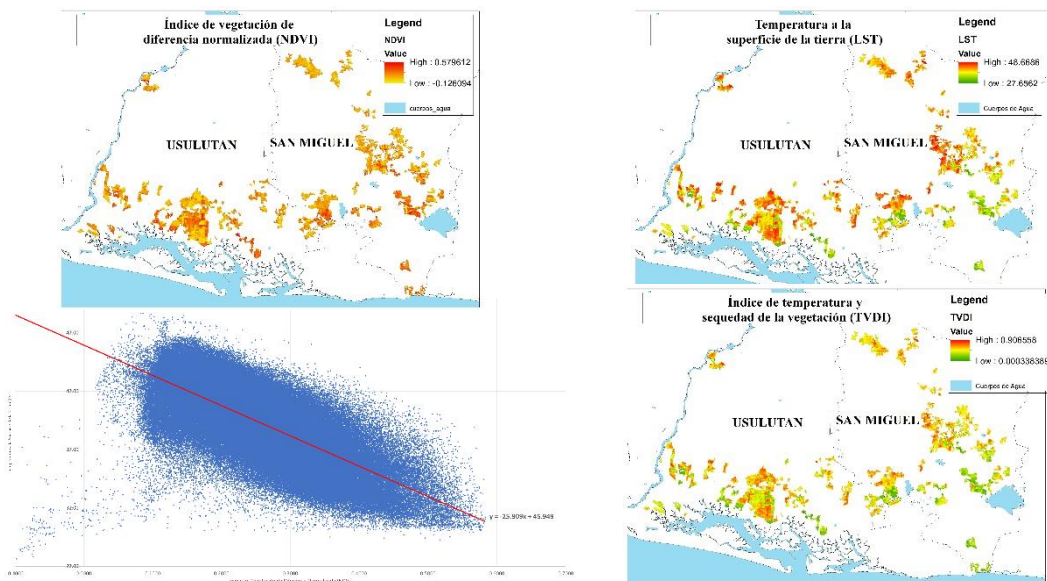


Figura A 3. Complementos de la imagen satelital del 28 de marzo del 2014.



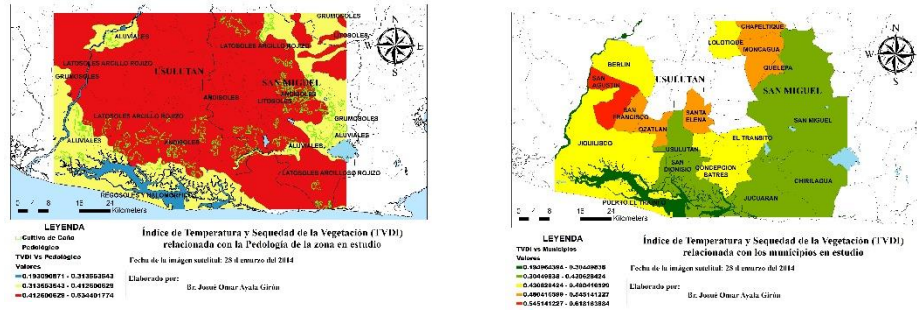


Figura A 4. Complementos de la imagen satelital del 13 de abril del 2014.

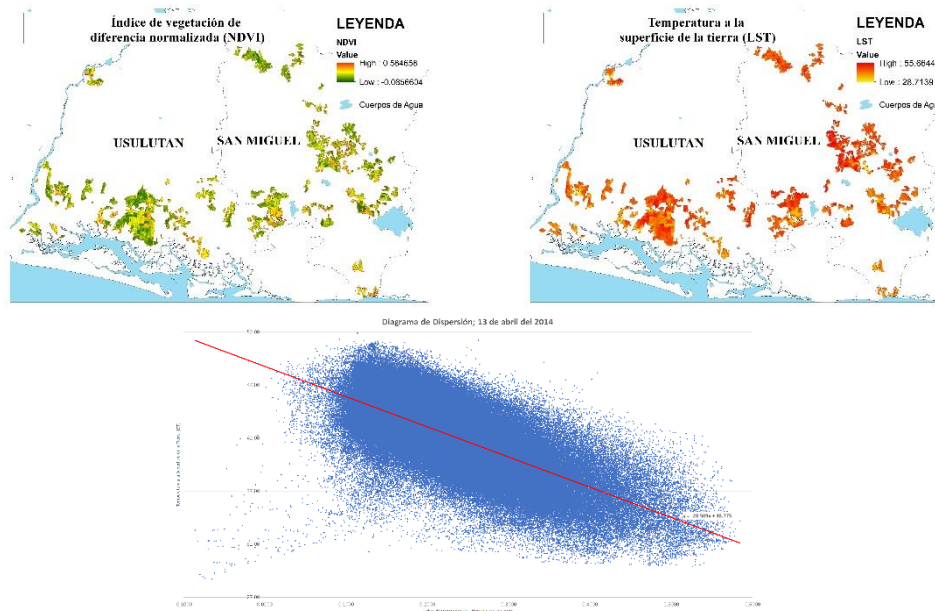
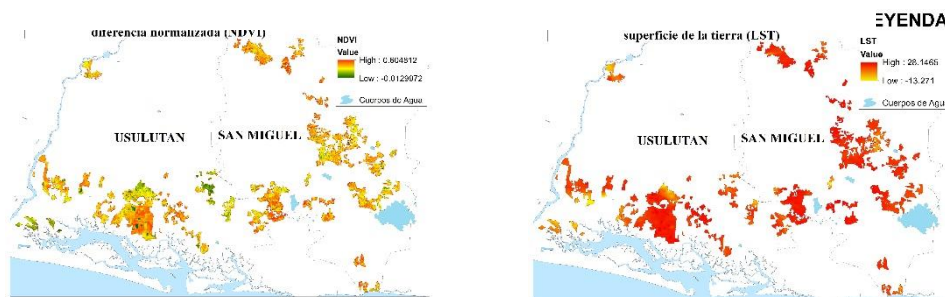


Figura A 5. Complementos de la imagen satelital del 02 de julio del 2014.



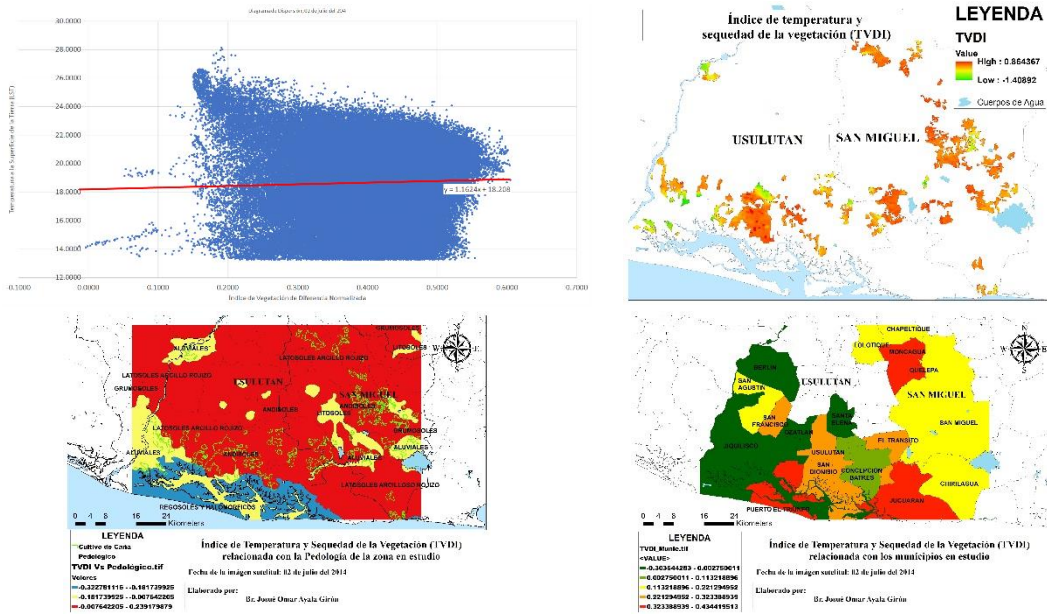


Figura A 6. Complementos de la imagen satelital del 18 de julio del 2014.

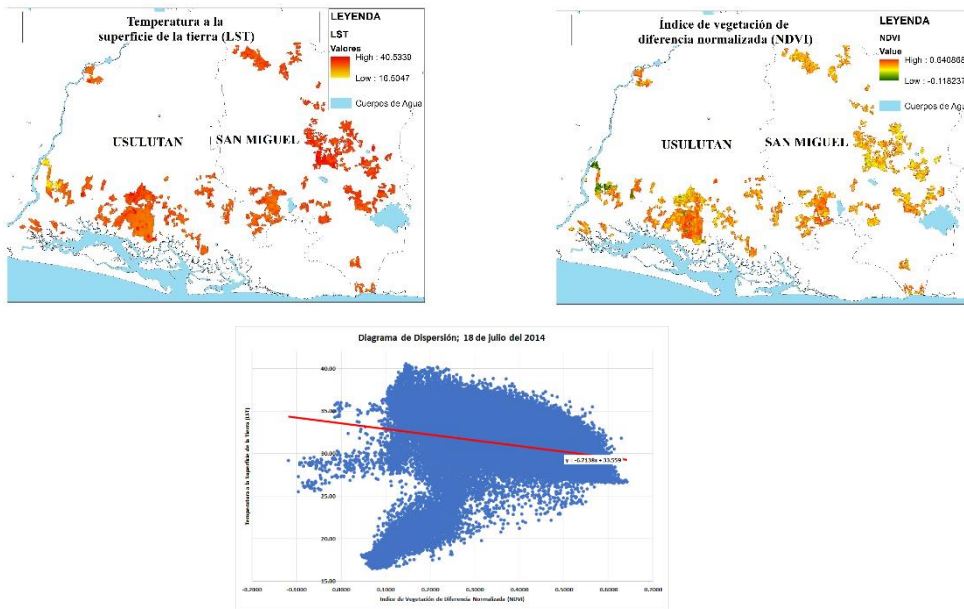


Figura A 7. Complementos de la imagen satelital del 06 de octubre del 2014.

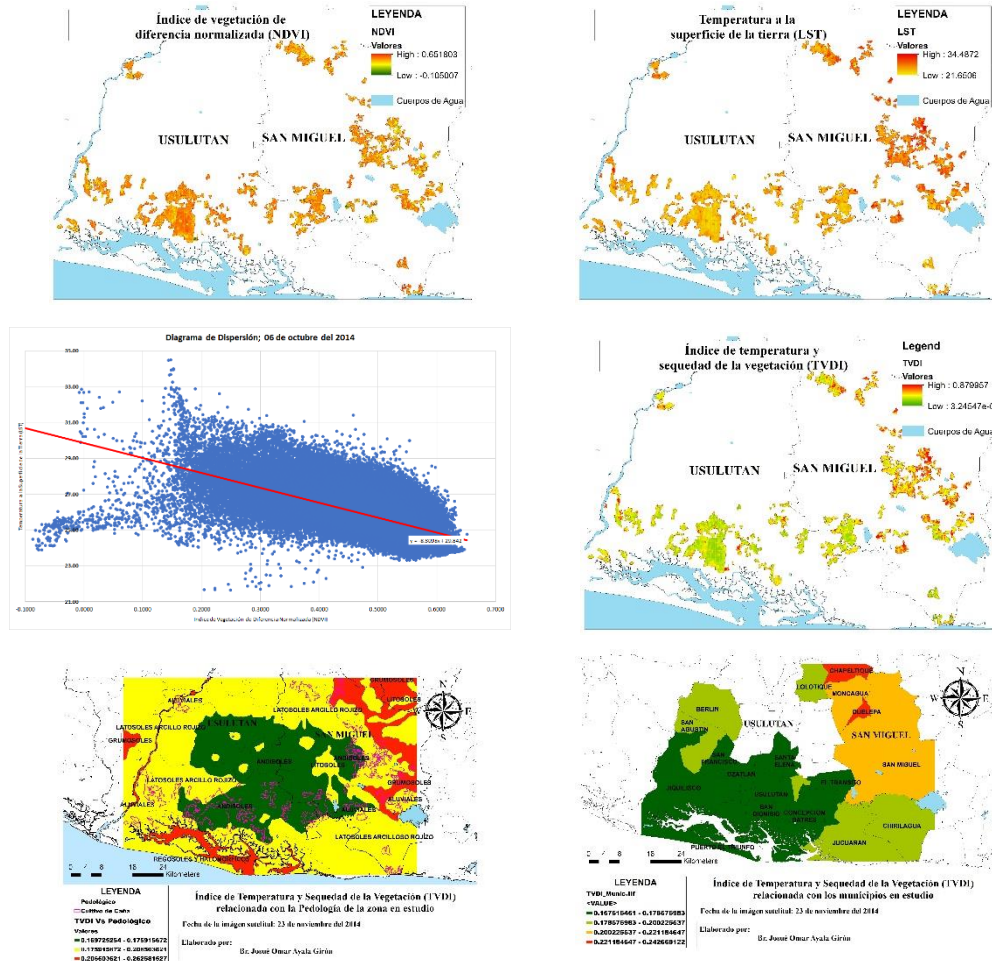
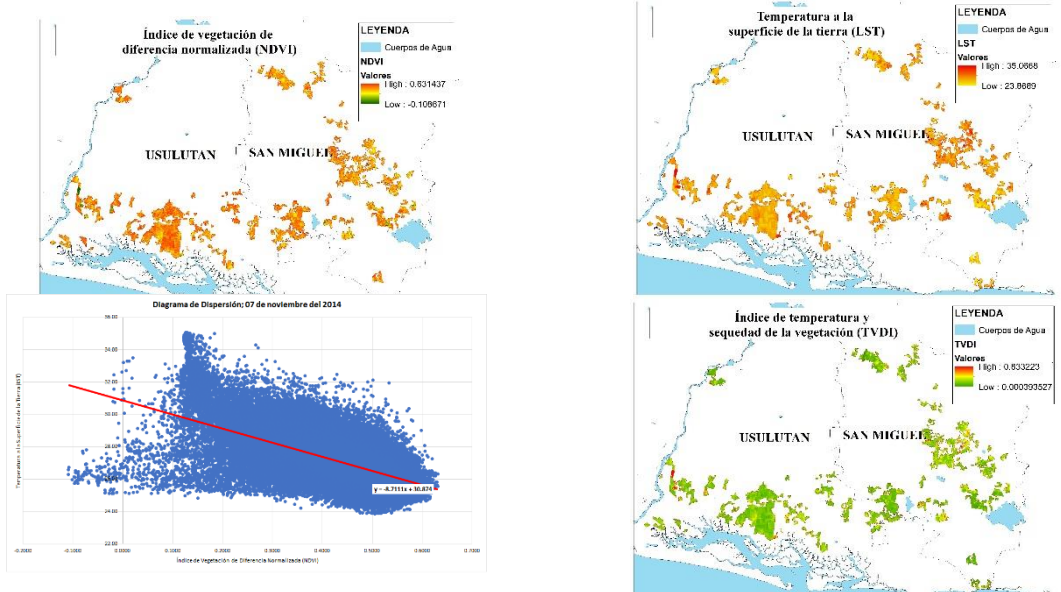


Figura A 8. Complementos de la imagen satelital del 07 de noviembre del 2014.



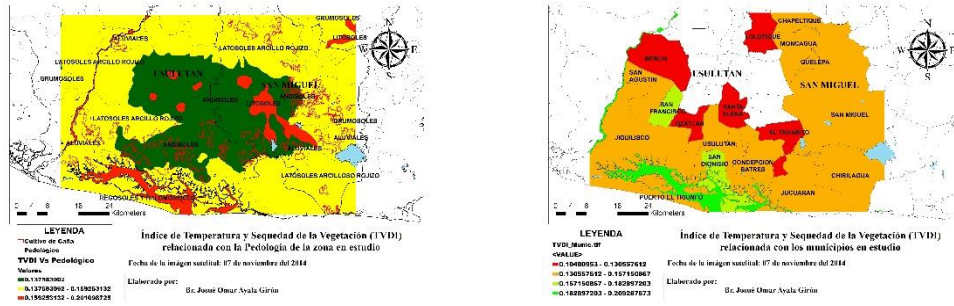


Figura A 9. Complementos de la imagen satelital del 23 de noviembre del 2014.

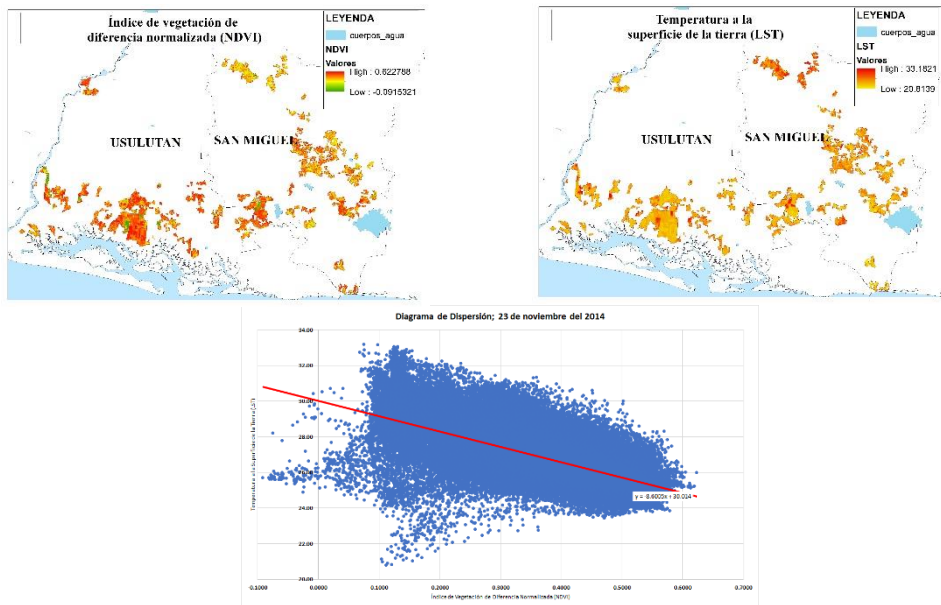
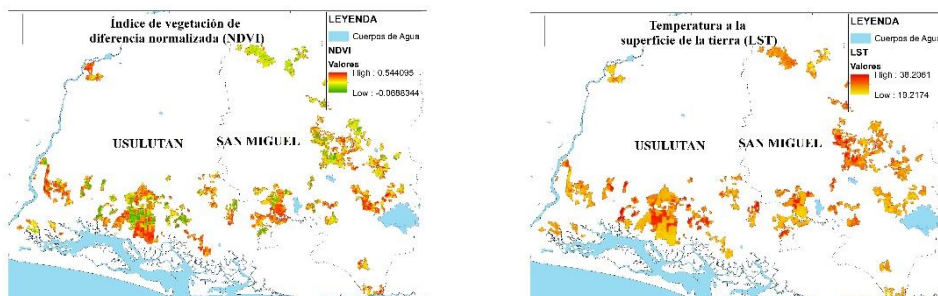


Figura A 10. Complementos de la imagen satelital del 25 de diciembre del 2014.



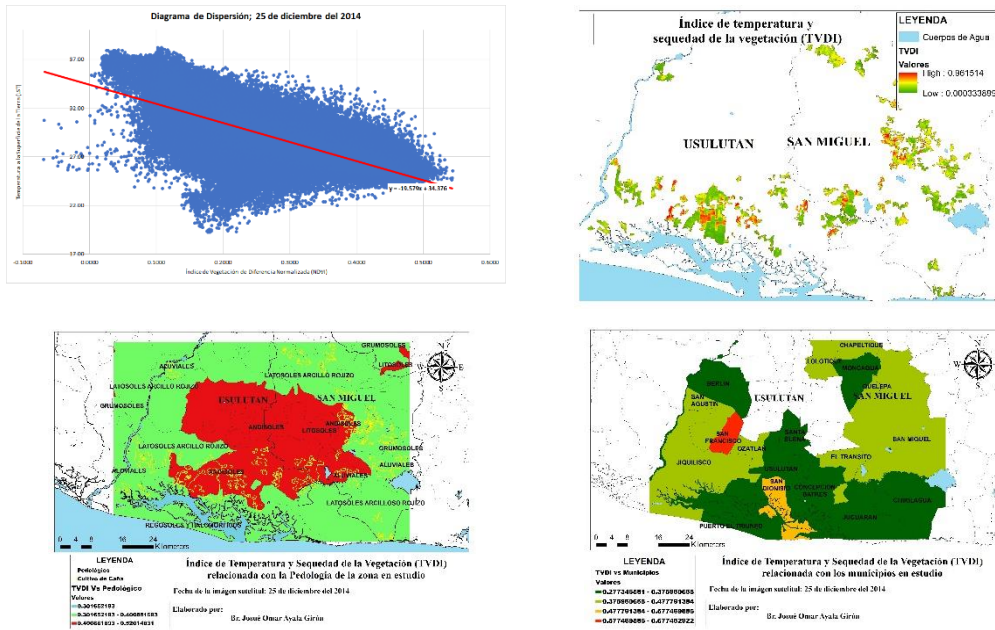


Figura A 11. Complementos de la imagen satelital del 10 de enero del 2015.

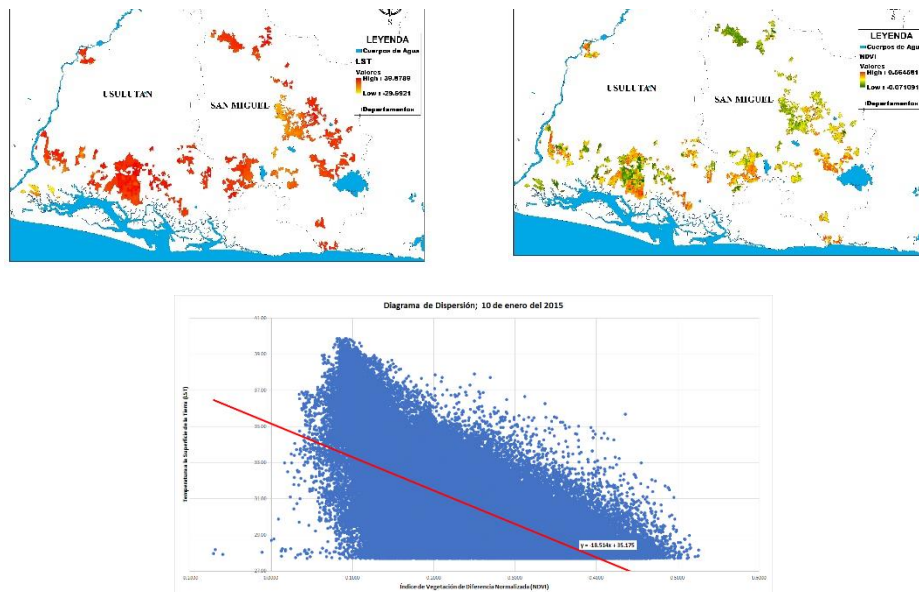


Figura A 12. Complementos de la imagen satelital del 15 de marzo del 2015.

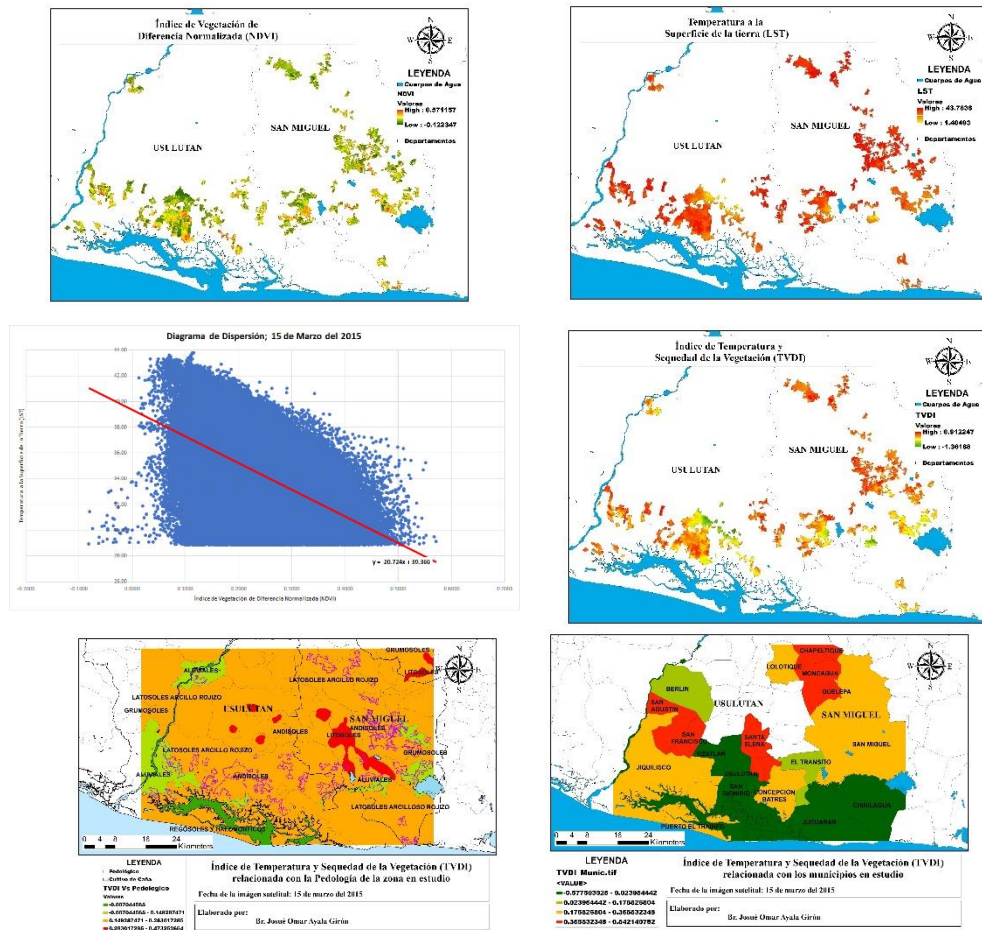
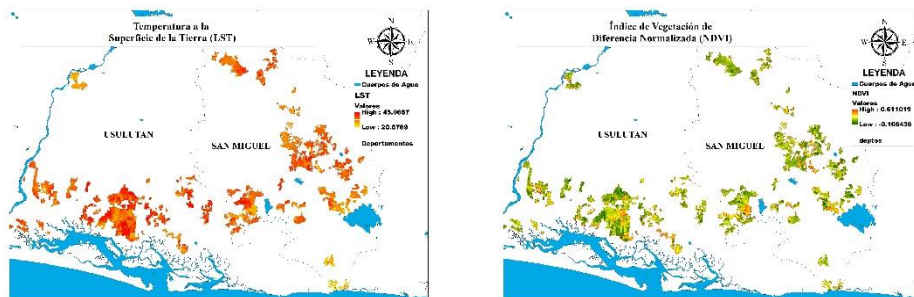


Figura A 13. Complementos de la imagen satelital del 31 de marzo del 2015.



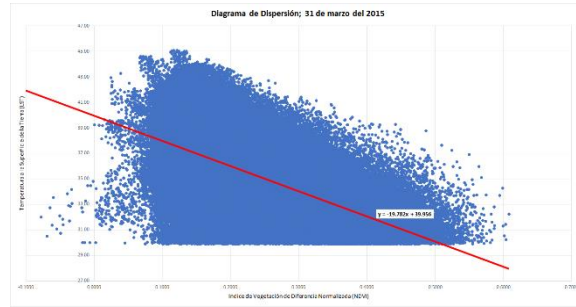


Figura A 14. Complementos de la imagen satelital del 02 de mayo del 2015.

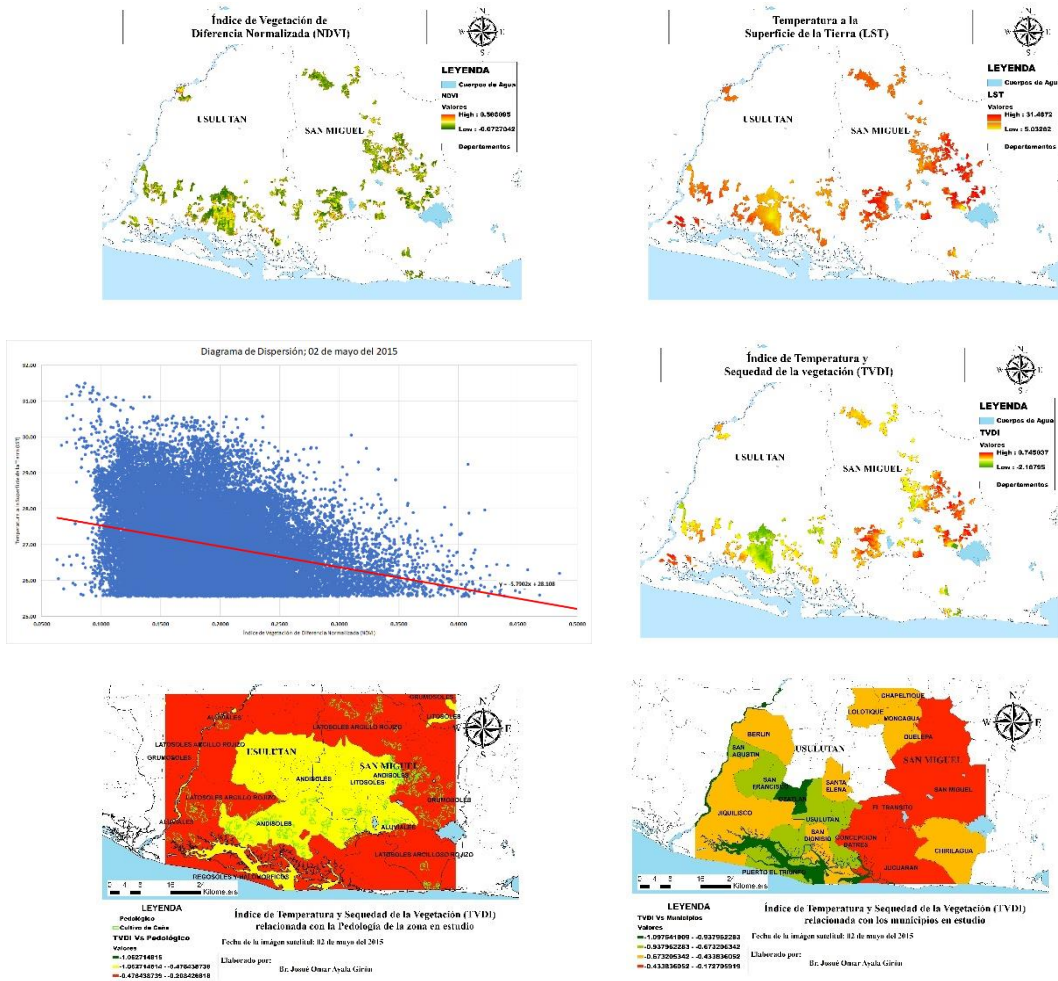


Figura A 15. Complementos de la imagen satelital del 18 de mayo del 2015.

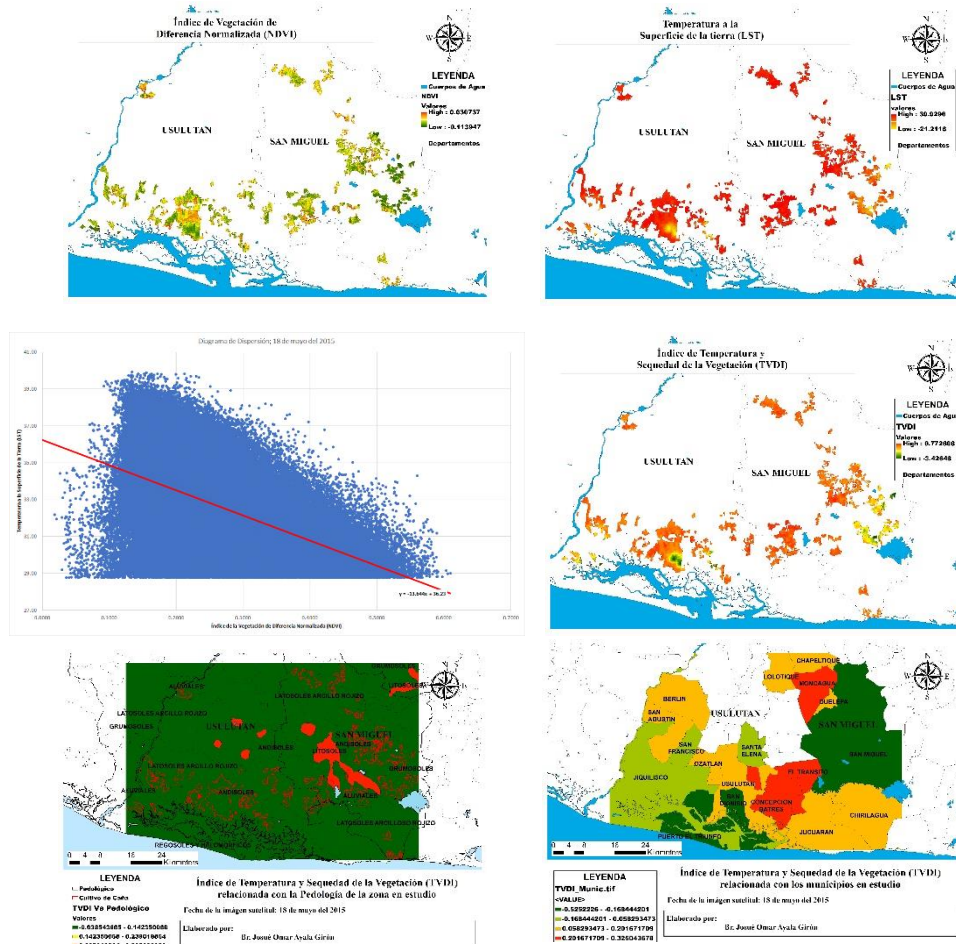
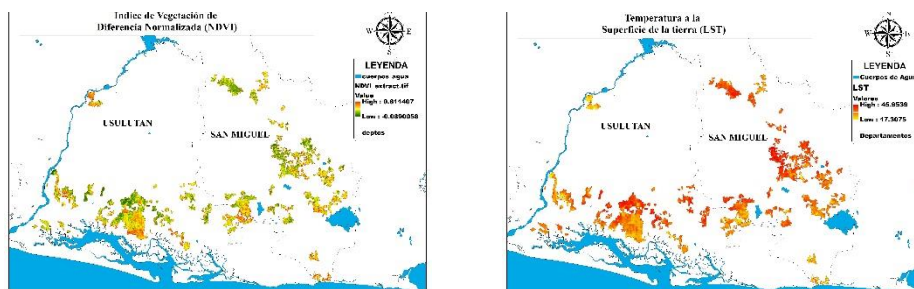


Figura A 16. Complementos de la imagen satelital del 06 de agosto del 2015.



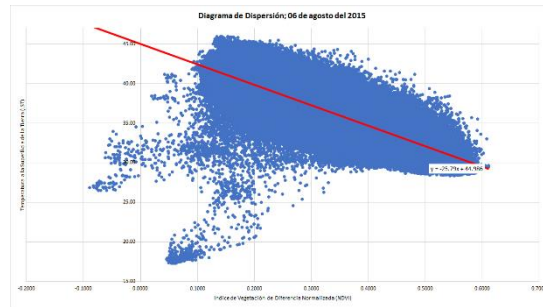


Figura A 17. Complementos de la imagen satelital del 09 de octubre del 2015.

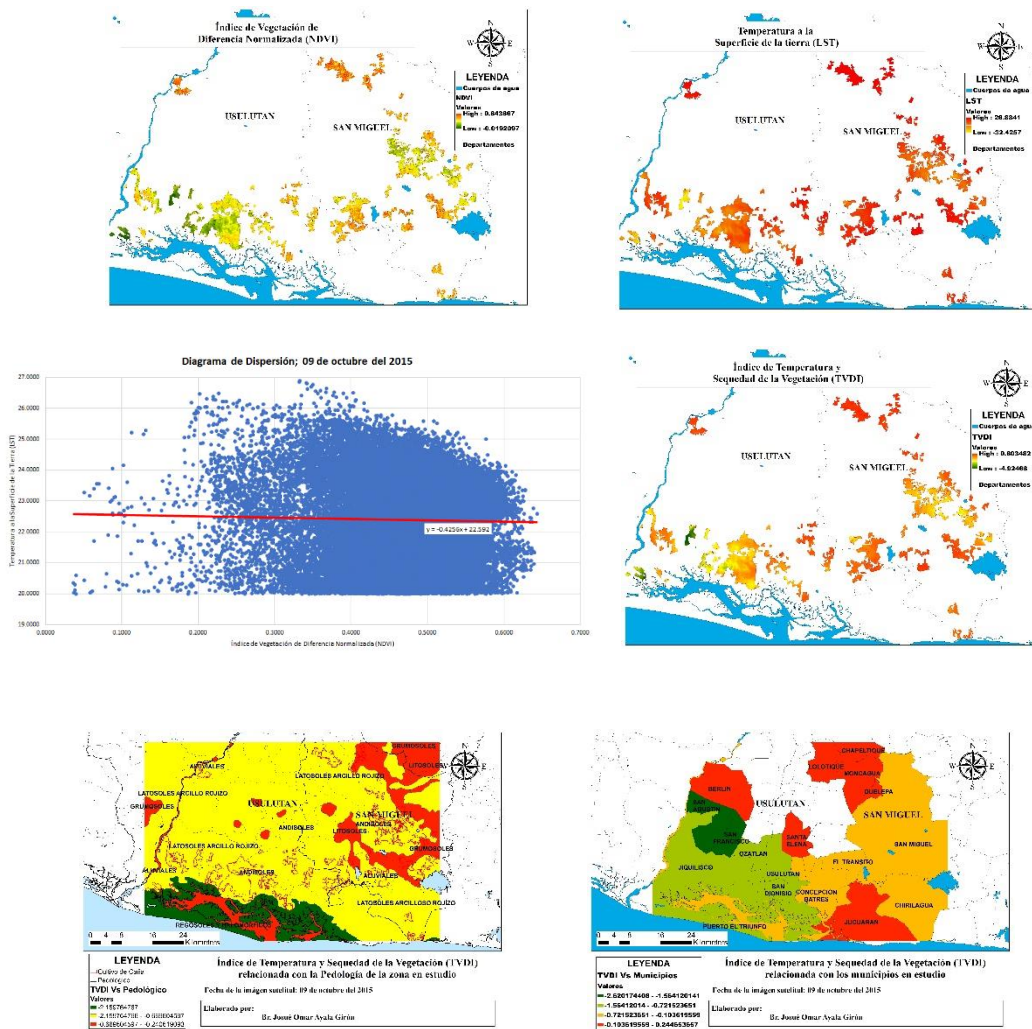


Figura A 18. Complementos de la imagen satelital del 26 de noviembre del 2015.

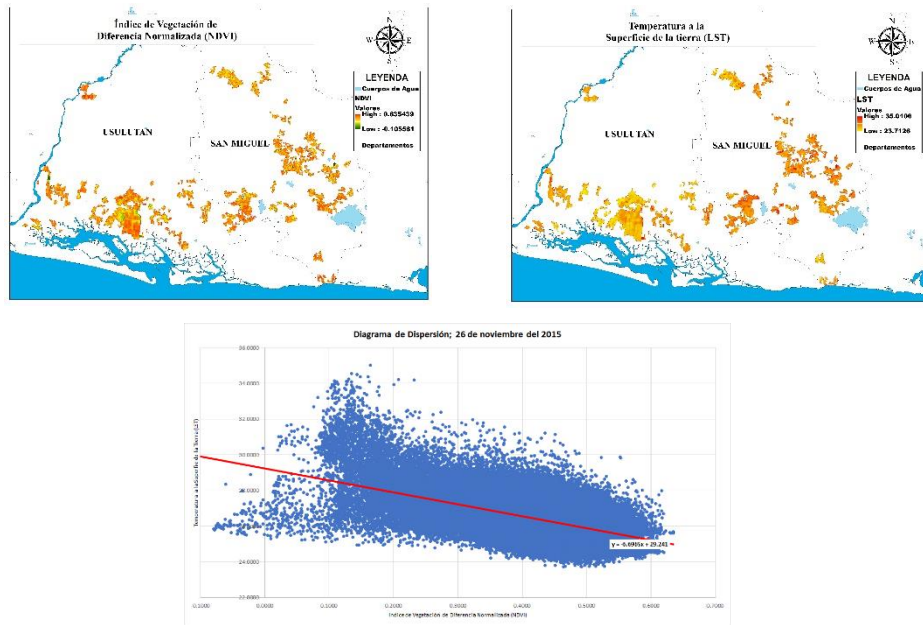
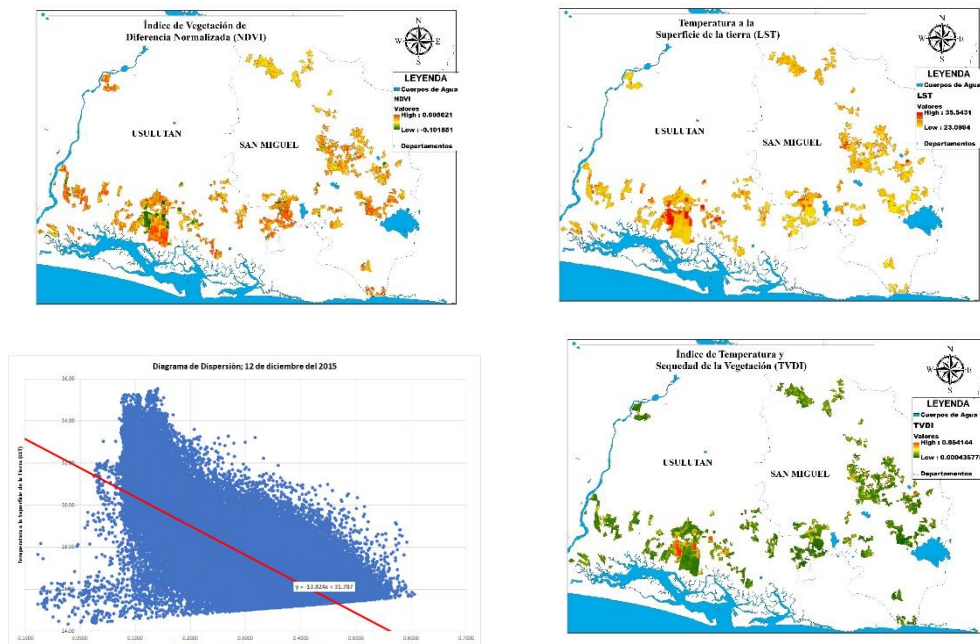


Figura A 19. Complementos de la imagen satelital del 12 de diciembre del 2015.



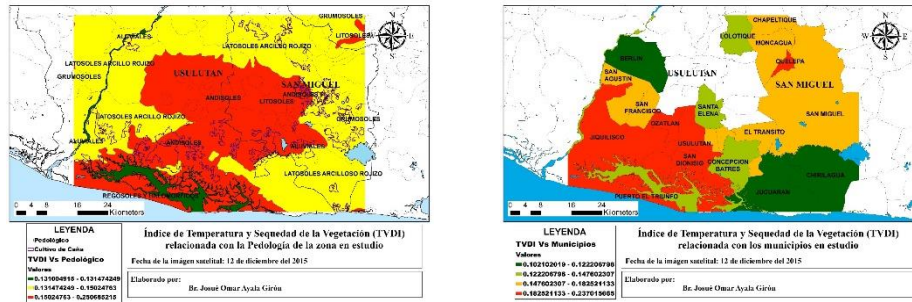
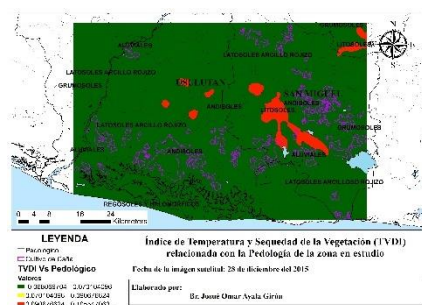
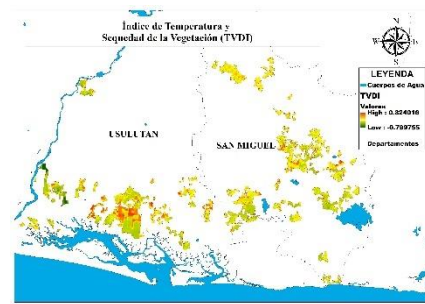
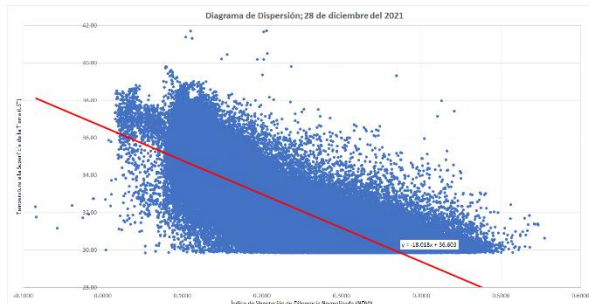
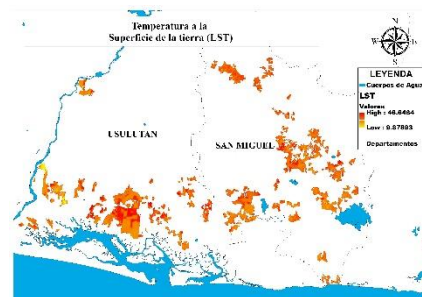
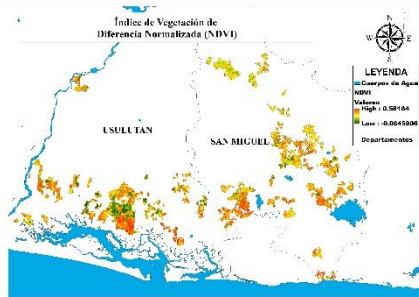


Figura A 20. Complementos de la imagen satelital del 28 de diciembre del 2015.



Cuadro A 5. Historial de precipitación acumulada de la zona en estudio durante los años del 2010 al 2019.

Fuente: Global Climate Monitor (Camarillo Naranjo et al. 2019).

Año	Mes	Precipitación acumulada (mm)	Año	Mes	Precipitación acumulada (mm)
2010	enero	2.6	2011	enero	3.5
	febrero	7.4		febrero	8.1
	marzo	0.5		marzo	14.8
	abril	51.5		abril	33.9
	mayo	260.2		mayo	118.5
	junio	276.8		junio	285.9
	julio	345.8		julio	269.2
	agosto	309.1		agosto	257.1
	septiembre	435.7		septiembre	242.1
	octubre	88.3		octubre	344.1
	noviembre	47.2		noviembre	46.4
	diciembre	1.8		diciembre	4.5
2012	enero	2.6	2013	enero	0
	febrero	2.4		febrero	0
	marzo	6.3		marzo	17.8
	abril	75		abril	24.7
	mayo	230.2		mayo	172.9
	junio	152.6		junio	201.5
	julio	76.4		julio	184.7
	agosto	475.7		agosto	237.4
	septiembre	138.1		septiembre	325.6
	octubre	277.7		octubre	296.1
	noviembre	15.6		noviembre	67.9
	diciembre	7.8		diciembre	1.9

Año	Mes	Precipitación acumulada (mm)	Año	Mes	Precipitación acumulada (mm)
2014	enero	2.1	2015	enero	0.2
	febrero	3.4		febrero	0.2
	marzo	18.3		marzo	10.9
	abril	0		abril	16.8
	mayo	244.4		mayo	23.8
	junio	222.9		junio	184
	julio	87.4		julio	103
	agosto	279.3		agosto	111.1
	septiembre	326.4		septiembre	291.9
	octubre	296.8		octubre	248.8
	noviembre	50.7		noviembre	133.5
	diciembre	0		diciembre	27.6
2016	enero	0	2017	enero	0
	febrero	0		febrero	0
	marzo	0		marzo	1.1
	abril	101.3		abril	31.2
	mayo	255		mayo	210.1
	junio	34.8		junio	320.4
	julio	162.3		julio	258.9
	agosto	218.8		agosto	220.5
	septiembre	282.7		septiembre	294.1
	octubre	259.8		octubre	219.4
	noviembre	31.6		noviembre	6.7
	diciembre	9.6		diciembre	11.6
Año	Mes	Precipitación acumulada (mm)	Año	Mes	Precipitación acumulada (mm)
2018	enero	3.9	2019	enero	7.5
	febrero	0		febrero	0
	marzo	2.7		marzo	0
	abril	80.1		abril	0
	mayo	256.4		mayo	194.2
	junio	184.7		junio	143.1
	julio	97.4		julio	139.2
	agosto	182.8		agosto	164.9
	septiembre	251.6		septiembre	352.2
	octubre	293.3		octubre	314
	noviembre	35.2		noviembre	35.3
	diciembre	0		diciembre	0
2020	enero	1.1			
	febrero	1.6			
	marzo	6.4			
	abril	8			
	mayo	179.4			
	junio	177.1			
	julio	224.7			
	agosto	260.5			
	septiembre	354.5			
	octubre	258.7			
	noviembre	248.3			
	diciembre	0			

Cuadro A 6. Datos de temperatura de la zona en estudio de los años del 2010 al 2019.
Fuente: Global Climate Monitor (Camarillo Naranjo et al. 2019).

Año	Mes	Temperatura (C°)	Año	Mes	Temperatura (C°)
2010	enero	25.4	2011	enero	26
	febrero	26.2		febrero	25.7
	marzo	28.2		marzo	26.2
	abril	28		abril	27.3
	mayo	27.2		mayo	27.2
	junio	26.5		junio	25.9
	julio	26		julio	25.9
	agosto	25.6		agosto	26.1
	septiembre	25.3		septiembre	25.5
	octubre	25.2		octubre	24.1
	noviembre	24.3		noviembre	24.2
	diciembre	24		diciembre	24.8
2012	enero	26	2013	enero	25.6
	febrero	25.2		febrero	25.5
	marzo	27		marzo	26.2
	abril	27.7		abril	28.1
	mayo	25.6		mayo	27.3
	junio	25		junio	26.4
	julio	25.9		julio	26.6
	agosto	25.5		agosto	26.5
	septiembre	24.7		septiembre	25.9
	octubre	24.3		octubre	26.1
	noviembre	23.8		noviembre	25.4
	diciembre	24.2		diciembre	25.2
2014	enero	22.2	2015	enero	24
	febrero	25.4		febrero	23.8
	marzo	26.8		marzo	25.6
	abril	27.6		abril	27.1
	mayo	25.5		mayo	26.4
	junio	26.3		junio	25.6
	julio	26		julio	26.9
	agosto	26.5		agosto	26.8
	septiembre	24.5		septiembre	25.7
	octubre	24.4		octubre	25.5
	noviembre	24.2		noviembre	25.5
	diciembre	23.6		diciembre	25
2016	enero	24.1	2017	enero	24.9
	febrero	23.5		febrero	25.6
	marzo	26.4		marzo	25.2
	abril	27.3		abril	26.7
	mayo	27.1		mayo	26.1
	junio	25.5		junio	25.4
	julio	25.7		julio	25.4
	agosto	25.7		agosto	25.4
	septiembre	25.1		septiembre	25.2
	octubre	24.4		octubre	24.4
	noviembre	23.9		noviembre	23.6
	diciembre	24.4		diciembre	23.3

Año	Mes	Temperatura (C°)		Año	Mes	Temperatura (C°)
2018	enero	21.9		2019	enero	24.1
	febrero	23.6			febrero	25.7
	marzo	25.1			marzo	24.9
	abril	26.3			abril	26.1
	mayo	25.7			mayo	26.1
	junio	24.8			junio	26.8
	julio	25.7			julio	25.3
	agosto	25.4			agosto	25.2
	septiembre	24.9			septiembre	25.1
	octubre	24.5			octubre	24.4
	noviembre	25.7			noviembre	24.6
	diciembre	24.5			diciembre	23.9
2020	enero	23.6				
	febrero	24.3				
	marzo	24.7				
	abril	28				
	mayo	25.9				
	junio	24.7				
	julio	25.4				
	agosto	25.5				
	septiembre	25.2				
	octubre	24.4				
	noviembre	23.3				
	diciembre	22.6				