

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

**CODIGO: AI-2205**

**NOMBRE DE LA INVESTIGACIÓN**

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.

**TÍTULO A OBTENER:** Ingeniero Agrónomo

**AUTORES.**

<b>Nombres, apellidos y formación académica</b>	<b>Institución y Dirección</b>	<b>Teléfono y correo electrónico</b>	<b>Firma</b>
Br. Josué Omar Ayala Girón	Colonia Macarena casa #8, Santa Cruz Michapa, Cuscatlán	7603-1457 <a href="mailto:jomar.ayalg@gmail.com">jomar.ayalg@gmail.com</a>	
Ing. M. Sc. PH. D. Miguel Ángel Hernández Martínez	Universidad de El Salvador. Facultad de Ciencias Agronómicas	7786-1635 <a href="mailto:miguel.hernandez@ues.edu.sv">miguel.hernandez@ues.edu.sv</a>	
Ing. Agr. M. Sc. José Mauricio Tejada Asencio	Universidad de El Salvador. Facultad de Ciencias Agronómicas.	7633-2415 <a href="mailto:jose.tejada@ues.edu.sv">jose.tejada@ues.edu.sv</a>	

**VISTO BUENO**

**Coordinador General de Procesos de Graduación del Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente:**

Ing. Agr. M. Sc. Nelson Bernabé Granados Alvarado **Firma:** \_\_\_\_\_

**Director General de Procesos de Graduación Facultad de Ciencias Agronómicas:**

Ing. Agr. Enrique Alonso Alas García **Firma:** \_\_\_\_\_

**Jefe del Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente:**

Ing. Agr. M.Sc. José Mauricio Tejada Asencio **Firma:** \_\_\_\_\_

**Sello:**

Lugar y fecha: Ciudad Universitaria, febrero de 2022

## **NOMBRE DE LA INVESTIGACIÓN:**

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.

**AUTORES:** Ayala-Girón JO<sup>1</sup>, Hernández-Martínez MA<sup>2</sup>, Tejada- Asencio JM<sup>3</sup>.

## **RESUMEN.**

El estudio 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.

---

<sup>1</sup> Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Estudiante tesista.

<sup>2</sup> Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Docente Director.

<sup>3</sup> Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Docente Director.

**NAME OF RESEARCH:**

Evaluation of water stress in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) during the drought of 2014 and 2015 in the dry corridor of the departments of Usulután and San Miguel, El Salvador.

**AUTHORS:** Ayala-Girón JO<sup>4</sup>, Hernández-Martínez<sup>5</sup>, Tejada- Asencio JM<sup>6</sup>.

**ABSTRACT.**

The research 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.

**Keywords:** Urban trees, sidewalk trees, i-Tree Eco®, guidelines, characterization, ecosystem services.

---

<sup>4</sup> Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Estudiante tesista.

<sup>5</sup> Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Docente Director.

<sup>6</sup> Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Docente Director.

## **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 denominado 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 buen indicador para la evaluar 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). En estos procesos se aplican frecuentemente sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica para el análisis de variables hidrológicas de interés agroindustrial siendo un ejemplo de ello la estimación de evaporación y transpiración, el porcentaje de material vegetal y las condiciones fitosanitarias (Rivas *et al.* 2005).

Es por ello que esta investigación pretende prevenir los impactos ocasionados por sequías extremas en el cultivo de caña de azúcar, a través del análisis espacio-temporal del estrés hídrico 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), a partir de 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. MATERIALES Y METODOS.**

### **2.1. Descripción del lugar 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 A-1).

### **2.2. Tipo de Estudio**

Esta investigación es de tipo 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.

### 2.3. Metodología de laboratorio.

Para la estimación del TVDI se utilizó el modelo propuesto por (Sandholt *et al.* 2002), el cual utiliza como insumos principales la temperatura de la superficie de la tierra y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. El TVDI se expresa en el modelo siguiente:

$$TVDI = \left( \frac{LST - T_{min}}{(a * NDVI + b) - T_{min}} \right) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde Ts es la temperatura de superficie observada en el píxel (K), T<sub>min</sub> 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 Ts. 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 con la aplicación de las ecuaciones algorítmicas en la calculadora ráster del ArcMap (Hernández 2019).

#### 2.3.1. Obtención de imágenes Satelitales LANDSAT8 y sus metadatos.

Se descargaron las imágenes satelitales desde la plataforma virtual de GloVis de NASA, con sus metadatos (cuadro 1). 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).

Cuadro 1. Metadatos de imágenes tipo LANDSAT 8. (Hernández 2019)

Parámetros	Valores
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
<b>RADIANCIA de las bandas TIRS</b>	
RADIANCIA_MULT_BAND_10=	0.00033420
RADIANCIA_ADD_BAND_10=	0.10000
<b>CONSTANTES DE TEMPERATURA</b>	
K1_CONSTANT_BAND_10=	774.8853
K2_CONSTANT_BAND_10=	1321.0789

#### 2.3.2. Determinación de la radiancia de la temperatura de brillo (TB).

Para determinar la TB en grados KELVIN fue necesario aplicar la Ecuación 2. Donde las RADIANCIAS MULT y ADD BAND 10, provienen de los metadatos de las imágenes LANDSAT 8.

$$TB = RADIANCIA\_MULT\_BAND\_10 * BANDA\ TERMICA\ B10 + RADIANCIA\_ADD\_BAND\_B10 \quad \text{Ec. 2}$$

– **Determinación de la temperatura de brillo (T):** Para procesar los datos de la Temperatura es necesario tenerlos en grados Centígrados y para ello se aplicó la Ecuación 3.

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

Donde:

*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<sub>1</sub>*: Constante de conversión K1 específica (K1\_CONSTANT\_BAND \_10).

*K<sub>2</sub>*: Constante de conversión K2 específica (K2\_CONSTANT\_BAND \_10).

– **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 la Ecuación 4.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

*NIR*: Es la reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano.

*R*: Es la reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo.

– **Cálculo de proporción de la vegetación (PV).**

Para el cálculo de la Proporción de la Vegetación se utilizó los datos del ráster NDVI, aplicándolo la ecuación 5.

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

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.

– **Cálculo de la Emisividad de la Superficie de la Tierra (LSE).**

para calcular el LSE (Land Surface Emissivity), mediante la ecuación 6.

$$e = m.PV + n \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

*m*: Emisividad promedio de la vegetación (0.004).

*n*: Emisividad promedio del suelo (0.986).

*PV*: Proporción de la vegetación.

– **Cálculo de la Temperatura de la Superficie de la Tierra (LST).**

Para Calcular el LST se utilizó la ecuación 7,

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

donde:

$T$ : Es la Temperatura de Brillo en grados centígrados.

$\lambda$ : 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.

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

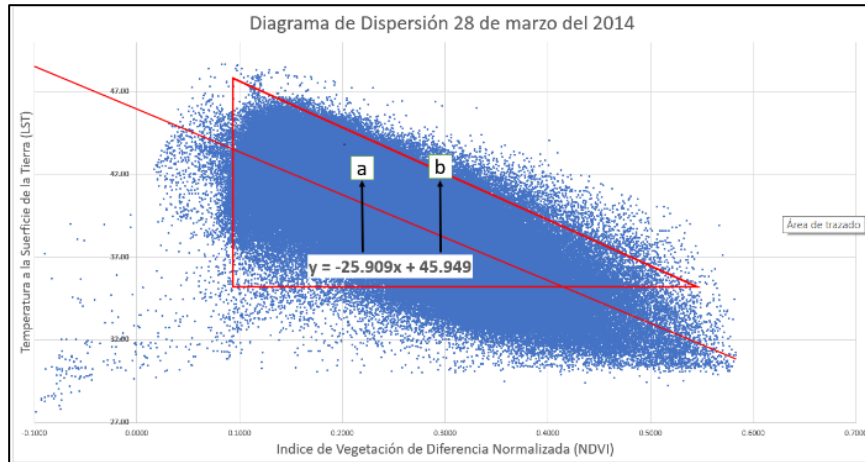


Figura 1. Diagrama de dispersión.

Para poder aplicar la ecuación de TVDI es necesario colocar las máscaras de la zonificación cultivo de caña de azúcar, estas capas se proceden a pasar a capas por puntos ya que cada píxel posee un identificador único que brindara los datos de ese píxel. A través de la tabla de atributos se exportaron a un documento Excel ® para elaborar un diagrama de dispersión (grafico 1), utilizando los datos de NDVI (en el eje de las “X”) y los datos de LST (en el eje de las “Y”). esto con la finalidad de obtener los datos de “a” y “b”, necesarios para la ecuación de TVDI, Como se muestra a continuación.

$$TVDI = \left( \frac{LST - T_{min}}{(a * NDVI + b) - T_{min}} \right) \quad \text{Ec. 8}$$

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).

Con los datos obtenidos de TVDI para cada imagen satelital se procesaron para poder graficarlos en Excel ® y crear un gráfico histórico de TVDI de los años en estudios. Con las capas de TVDI se relacionaron a las variables de tipos de suelo (Pedología) y los municipios de la zona en estudio.

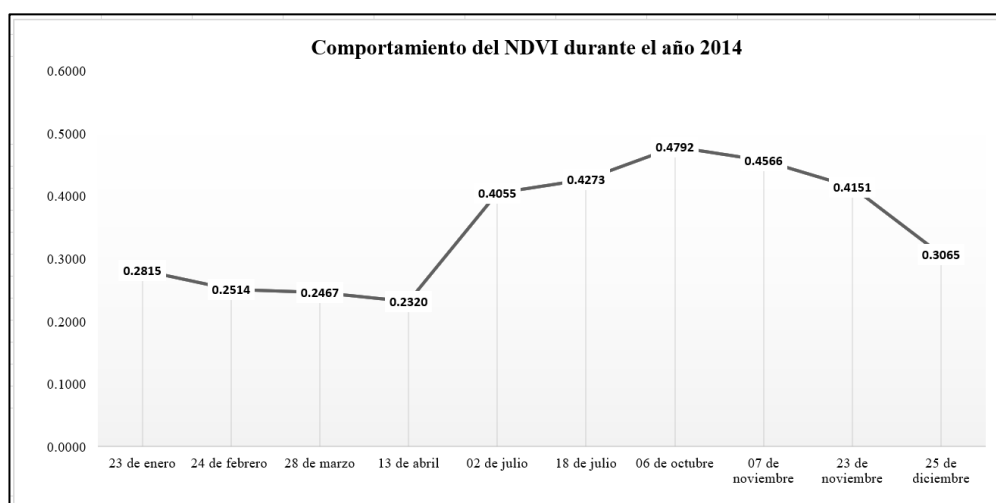
– **Datos Climatológicos de los años 2010 al 2019.**

Los datos climáticos de la precipitación y temperatura promedio fueron obtenidos en la plataforma denominada Global Climate Monitor (Camarillo Naranjo et al. 2019), 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.

Con estos datos climatológicos de Temperatura y Precipitación se elaboró un gráfico histórico de ambos datos climáticos, con la finalidad de analizar el comportamiento de estos.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION.

#### 3.1. El comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).



*Figura 2. Comportamiento de NDVI.*

El comportamiento de NDVI demostró 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, 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 de acuerdo con el mapa (figura A-4).

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.



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

En ambos años durante la germinación y desarrollo radicular se observó que las temperaturas de la superficie (Figura A-5) se mantuvieron en el rango óptimo de acuerdo con la investigación de Duarte y Gonzáles (2019), los cuales afirman que la temperatura para dicha fase debe de oscilar entre los 26 a los 33°C.

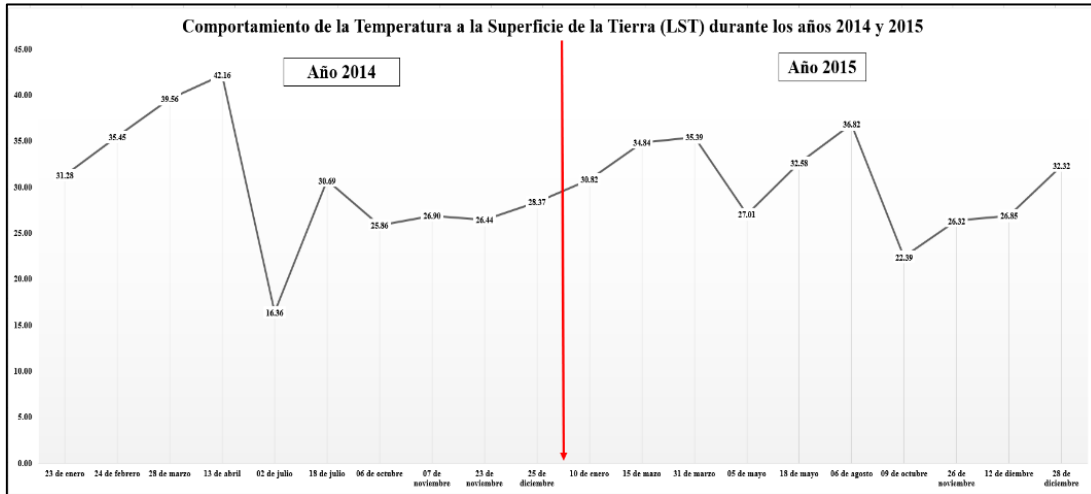


Figura 3. Comportamiento de LST.

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, 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 y Gonzáles (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 y Gonzáles (2019).

### 3.3. Índice de Temperatura y Sequedad de la Vegetación (TVDI).

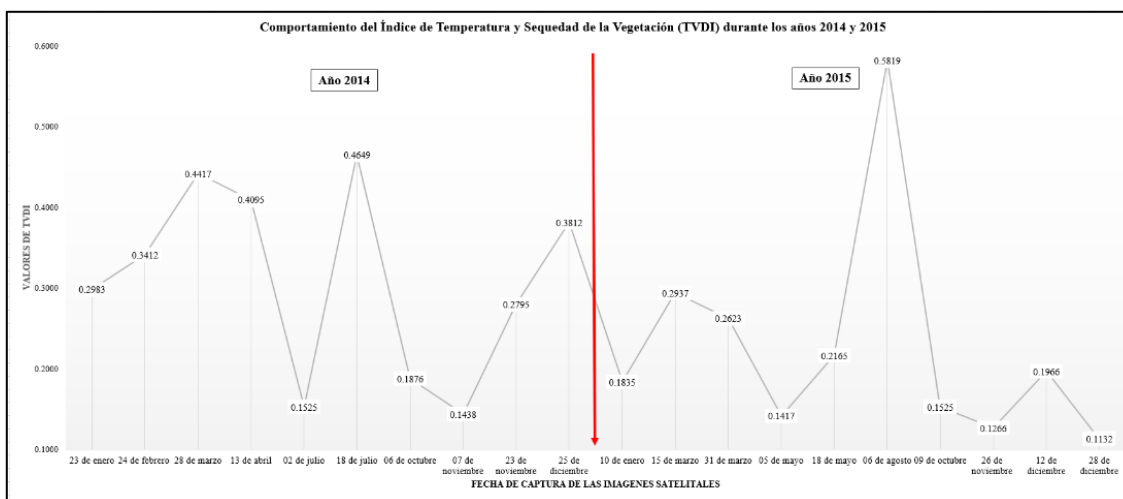


Figura 4. Comportamiento de TVDI.

Para la figura 4, 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 (Figura A-7) 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 con 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.

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

Durante el mes de marzo en El Salvador se registran las temperaturas 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 (Figura A-8).

Como se observa en el mapa de TVDI, 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.

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 (Figura A-9).

### 3.5. Historial climático de la Zona en Estudio.

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

De acuerdo con la figura A-2 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.

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

En la figura A-3 se identificó el comportamiento de la temperatura durante los últimos años en los que se observa anomalías desde el año 2011 hasta el año 2018; 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.

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

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

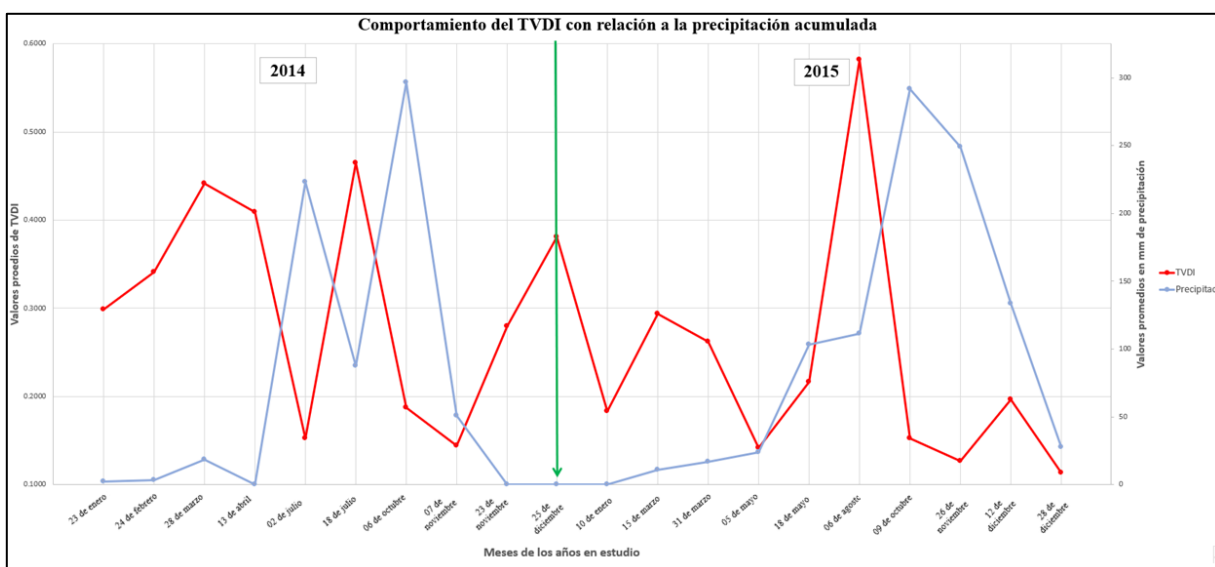


Figura 5. Comportamiento del TVDI y la precipitación.

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.

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

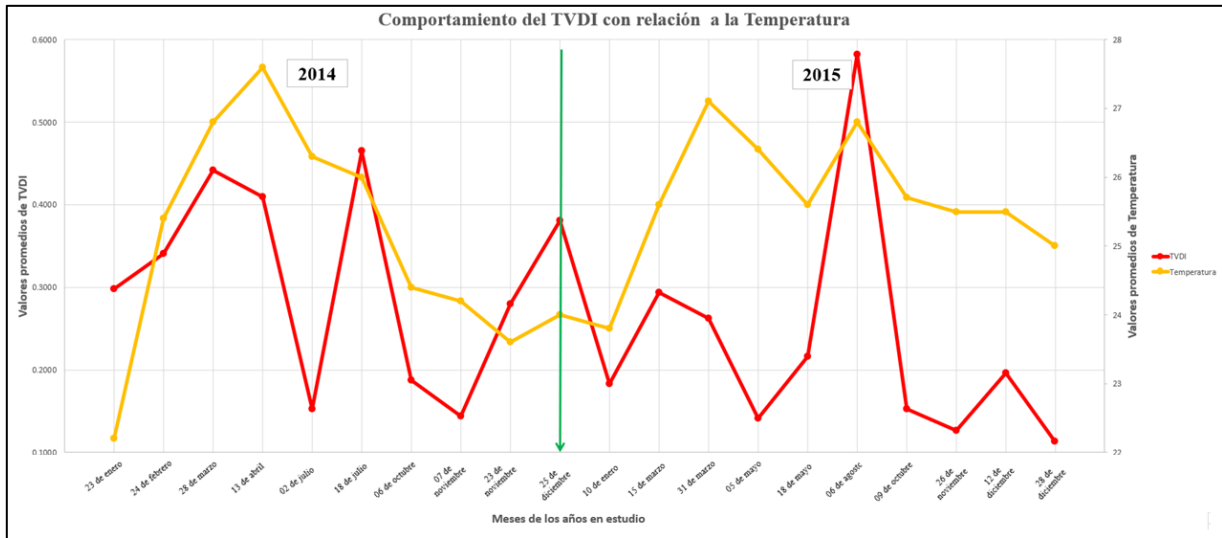


Figura 6. Comportamiento del TVDI y la temperatura.

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.

#### 4. 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.

## **5. 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.

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.

## 6. BIBLIOGRAFÍAS

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.

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.

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>

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

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.

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.

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.

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.

Medina, FJ. 2010. El Niño y la Oscilación del Sur. Oceanografía, Servicio Nacional de Estudios Territoriales. El Salvador. 10 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 sequias y sus impactos en el entorno de cambio climático global. San Salvador, El Salvador. 4 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.

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.

## 7. ANEXOS

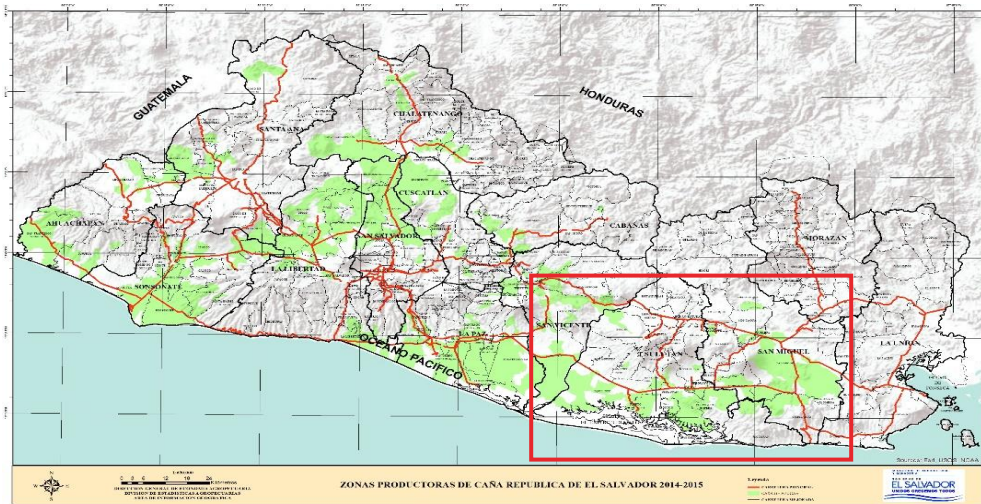


Figura A- 1. Zonas productoras de Caña, Republica de El Salvador.

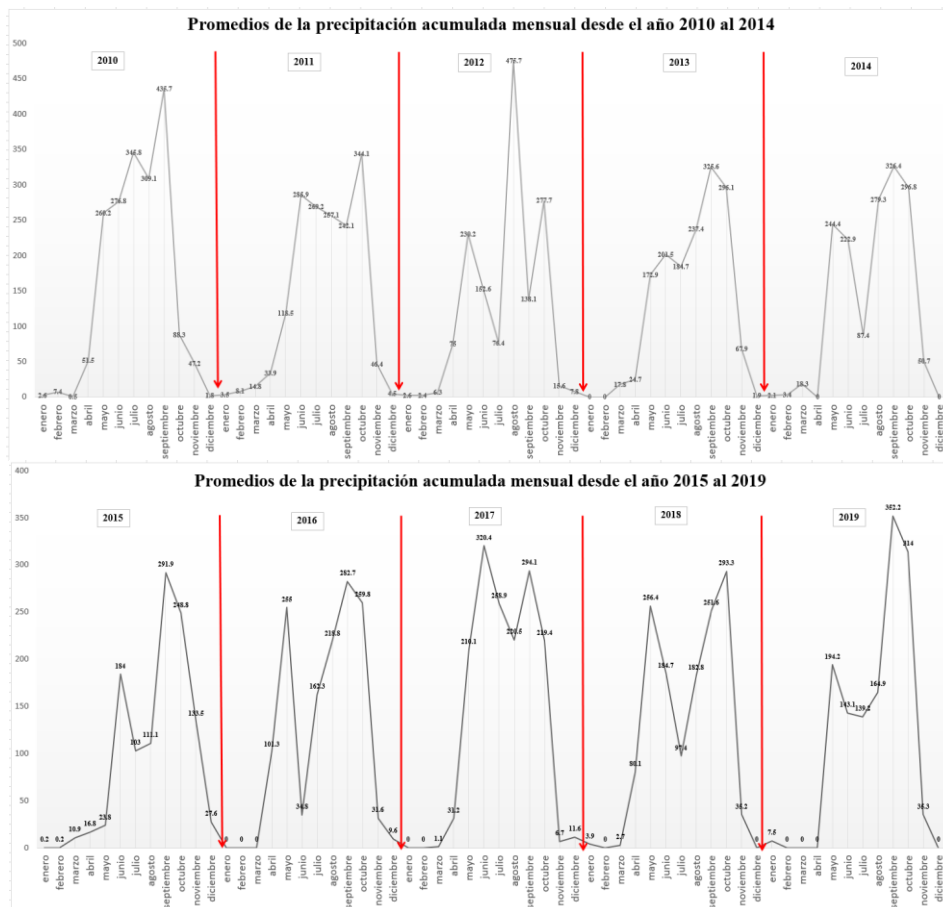


Figura A- 2. Precipitación Acumulada de los años 2010 al 2019.

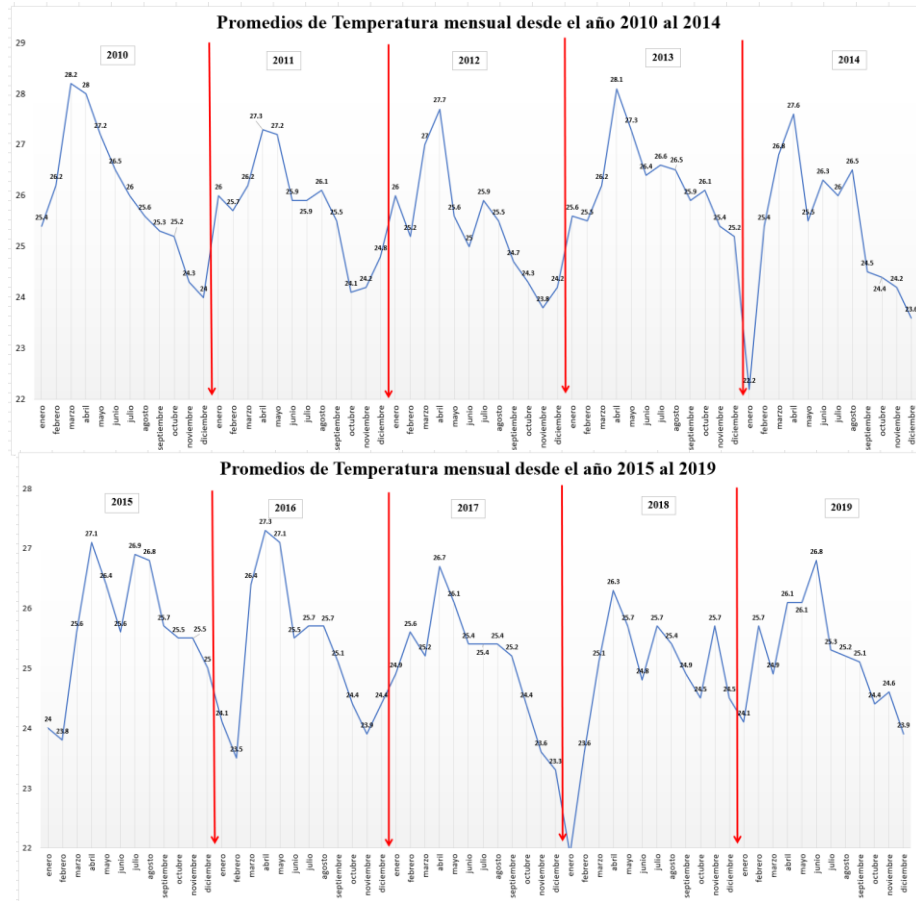


Figura A- 3. Temperatura en la zona de estudio del año 2010 al 2019.

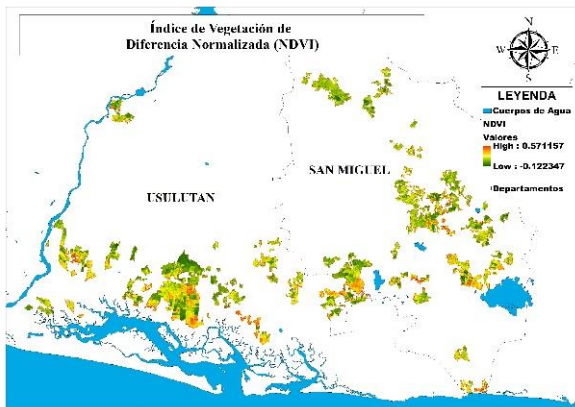


Figura A- 4. Mapa de NDVI.

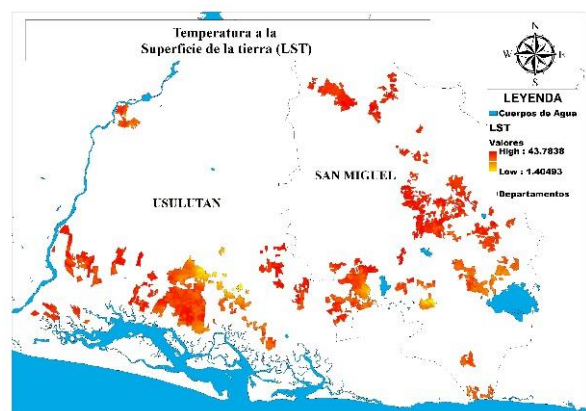


Figura A- 5. Mapa de LST.



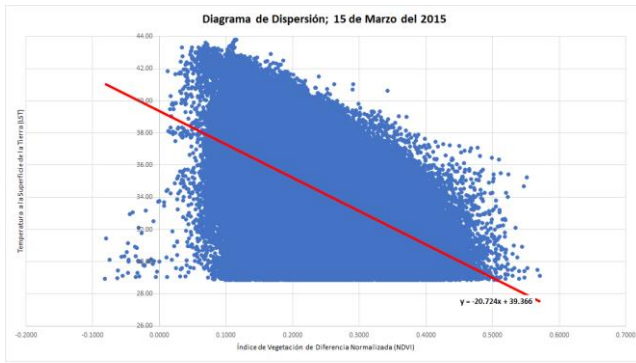


Figura A- 6. Diagrama de dispersión.

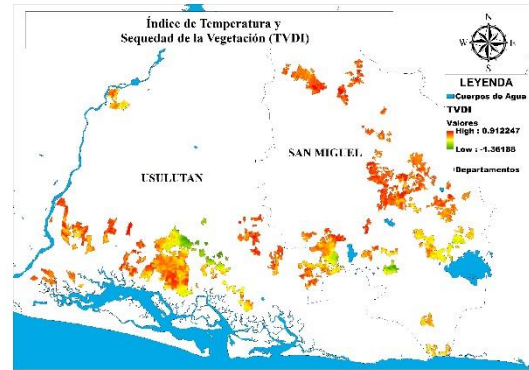


Figura A- 7. Mapa de TVDI.

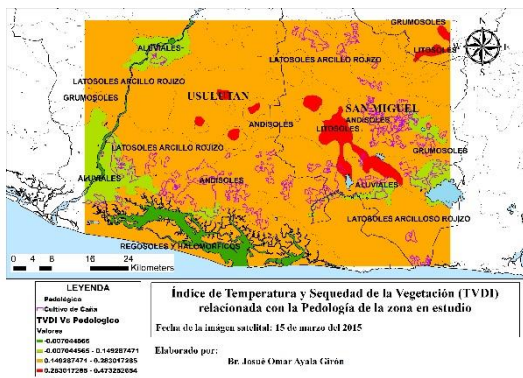


Figura A- 8. Mapa de TVDI y su relación con la pedología.

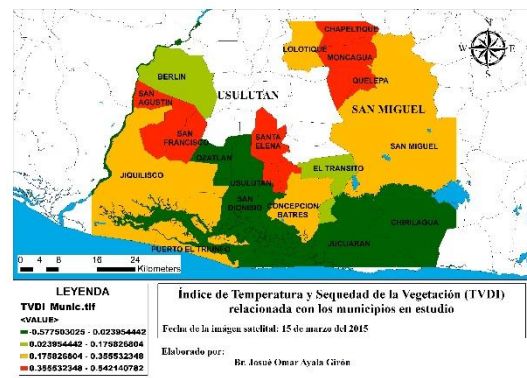


Figura A- 9. Mapa de TVDI y su relación con los municipios.