

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL**  
**DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**



**Comportamiento de la reflectancia en el cultivo de sorgo de acuerdo  
con la fenología y la ubicación geográfica**

POR

**JOANSI RAFAEL POZO MATUL**

**T E S I S**

Presentada como requisito parcial para obtener el título profesional de

**INGENIERO AGRONOMO ZOOTECNISTA**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

**Enero de 2022**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL  
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

**Comportamiento de la reflectancia en el cultivo del sorgo de acuerdo con la  
fenología y la ubicación geográfica.**

**T E S I S**

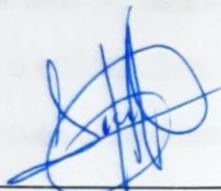
Presentada por

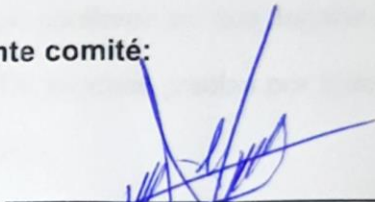
**JOANSI RAFAEL POZO MATUL**


Como requisito parcial para obtener el título profesional de

**INGENIERO AGRONOMO ZOOTECNISTA**

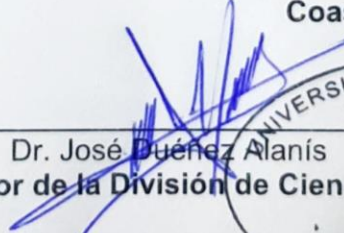
Fue dirigida por el siguiente comité:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Antonio Hernández Herrera  
**Asesor Principal**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Duéñez Alanís  
**Coasesor**

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Raquel Olivas Salazar  
**Coasesor**

\_\_\_\_\_  
Dr. Edwin Amir Contreras Briseño  
**Coasesor**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Duéñez Alanís  
**Coordinador de la División de Ciencia Animal**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Enero de 2022



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL**  
**DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

**Comportamiento de la reflectancia en el cultivo de sorgo de acuerdo con la fenología y la ubicación geográfica.**

**TESIS**

Presentada por

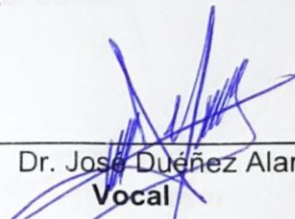
**JOANSI RAFAEL POZO MATUL**

y que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título profesional de


**INGENIERO AGRÓNOMO ZOTECNISTA**

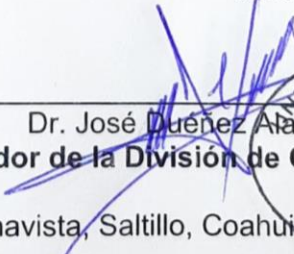
**APROBADA**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Antonio Hernández Herrera  
**Presidente**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Duñez Alanís  
**Vocal**

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Raquel Olivas Salazar  
**Vocal**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Edwin Amir Contreras Briseño  
**Vocal suplente**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Duñez Alanís  
**Coordinador de la División de Ciencia Animal**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Enero de 2022



## DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico con mucho amor y cariño a **Dios** que a pesar de mis errores él supo perdonarme y a limpiar mi alma.

A las pocas, pero importantes personas que han influido mucho en mi vida, y que por el tiempo que hemos pasado; lo cual experimentamos felicidad, tristeza y lecciones.

**A mis padres**, Sergio Alberto Pozo Gómez y Dora María Matul Méndez por haberme cuidado en la infancia, la adolescencia y en el tiempo que estuve en la universidad y que no dudo que puedo contar con su apoyo más adelante.

**A mis hermanos** Seryi Netzer Pozo Matul y Britani Pozo Matul a quienes quiero mucho.

**A toda mi familia** por qué a lo largo del tiempo confiaron en que llegaría a tener el título de INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA, muchas gracias por todos ellos, que también compartieron consejos a lo largo de mi vida.

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a **Dios** por permitirme vivir, por darme la oportunidad de tener una familia trabajadora que gracias a ello nunca nos faltó el alimento y el apoyo económico. Porque siempre está en mis oraciones, cuida de mí y los que me rodean, guía mi camino, y que cuida, y bendice de todas las cosas que paso día a día en la vida que llevo.

A mi **Alma Mater** por haberme dado la oportunidad de obtener los conocimientos para dar otro paso importante en mi vida, por darme ese privilegio de estar en una generación más de profesionales, por convertirme en todo un buen buitre y prepararme como un ingeniero capaz de resolver los problemas que se presentan hoy en día en el mundo de la agronomía.

A mi **padre** Sergio Alberto Pozo Gómez que nunca se olvidó de mi a pesar de la distancia y los problemas que pasaba, Dios me lo bendiga siempre, porque siempre tenía de él un consejo en las situaciones difíciles que yo pasaba.

A mi **madre** Dora María Matul Méndez por estar al pendiente de mi económicamente y de todas las cosas buenas y malas que me paso en la vida estudiantil, Dios me la bendiga.

Al **Dr. José Antonio Hernández Herrera** por haberme dado la oportunidad y aceptarme como tesista, por su paciencia, confianza, por estar al pendiente de la elaboración de la tesis y por la atención y dedicación, Dios me lo bendiga.

A **mis amigos de la UAAAN** José de Jesús Águila Pérez, Fernanda Aparicio López, José Alexis Arenas Victorino, Julio Gonzales Pérez, Elías Velázquez Moctezuma, Damián Miguel Bernal, María Fernanda Hernández Martínez, Dios me los bendiga a esos amigos que tuve en el transcurso de la carrera.

## CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Justificación.....	3
1.2.	Objetivo General.....	3
1.3.	1.3. Objetivos Específicos.....	3
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1.	Definiciones y términos.....	4
2.1.1.	Espectro electromagnético .....	4
2.1.2.	Firmas Espectrales.....	6
2.1.3.	Reflectancia, absorbancia y transmitancia.....	7
2.1.4.	Equipo y Unidades de medida .....	8
2.2.	Imágenes de satélite.....	9
2.3.	Clasificación digital .....	10
2.4.	Biblioteca de Firmas Espectrales.....	10
2.5.	Sorghum bicolor (L) Moench.....	11
2.5.1.	Origen.....	11
2.5.2.	Clasificación taxonómica .....	12
2.5.3.	Importancia del sorgo .....	12
2.5.4.	Utilización del sorgo.....	13
2.5.5.	Fenología del Sorgo .....	13
2.5.6.	Producción mundial .....	15
2.5.7.	Producción Nacional.....	18
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	21
3.1.	Localización del área de estudio y datos de reflectancia.....	21
3.2.	Análisis estadístico .....	23
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
V.	CONCLUSIONES.....	27
VI.	LITERATURA CITADA.....	28
VII.	ANEXOS.....	31

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético.....	4
Figura 2. Reflectancia en los cultivos y su rango .....	6
Figura 3. Hectáreas cosechadas de sorgo en el mundo entre los años 1961 y 2019. ...	17
Figura 4. Hectáreas cosechadas de sorgo en el mundo entre los años 1961 y 2019. ...	17
Figura 5. Ubicación de los municipios en donde se realizaron las evaluaciones de campo, Mexicali en Baja California, González en Tamaulipas, Vista hermosa y José Sixto Verduzco en Michoacán y Pénjamo en Guanajuato.....	21
Figura 6. Equipo portátil espectro radiómetro modelo PSR-1100-SN1374424 .....	22
Figura 7. Registro de la reflectancia de hojas de la planta de sorgo. ....	23
Figura 8. Comportamiento de la reflectancia de las hojas de sorgo por estado fenológico.....	25
Figura 9. Comportamiento de la reflectancia de las hojas de sorgo por ubicación geográfica.....	26

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Producción de sorgo por región.....	15
<b>Cuadro 2.</b> Los principales países productores de sorgo.....	16
<b>Cuadro 3.</b> Producción y rendimiento de sorgo total en México del año 2019. ....	18
<b>Cuadro 4.</b> Superficie total sembrada por cultivo anual en México del año 2019. ....	18
<b>Cuadro 5.</b> Producción nacional (miles de toneladas) de sorgo del ciclo primavera-verano en los años 2018 a 2020. ....	19
<b>Cuadro 6.</b> Producción nacional de sorgo del ciclo otoño-invierno (miles de toneladas) en los años 2018 a 2020. ....	20

## RESUMEN

La agricultura de precisión en las últimas décadas ha visto notables avances técnicos que han permitido un mejor manejo de los cultivos agrícolas, optimizando recursos e insumos aplicados. En el ámbito de la geomática, los sensores ópticos terrestres han permitido profundizar y ampliar el conocimiento del comportamiento espectral de los cultivos en estudio, con beneficios cada vez mayores en aplicación de tratamientos y prevención de enfermedades y/o plagas. El monitoreo, la evaluación y la ubicación geográfica de las superficies de Sorgo en México tienen la finalidad de coadyuvar en el manejo y la toma de decisiones en las actividades agrícolas. El objetivo del presente estudio fue identificar y comparar el comportamiento espectro electromagnético de *Sorghum bicolor* (L) Moench para evaluar la confiabilidad de los registros de reflectancia de la Biblioteca de firmas espectrales del SIAP-SAGARPA. Los datos de campo fueron con equipo portátil espectro radiómetro modelo PSR-1100-SN1374424 de Spectral Evolution®, con calibración radiométrica y rango de medición de longitud de onda de 300 a 1,100 nm. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor en PASW Statistics 18 IBM®, en el estudio de la fenología se evaluaron: el desarrollo vegetativo, la floración y la formación de panoja, la otra variable fue la ubicación geográfica en cuatro estados. En la evaluación de las etapas fenológicas no hubo diferencia entre los registros de reflectancia en las plantas de sorgo ( $F = 1.623$ ,  $gl = 2,70$   $P > 0.205$ ), mientras que en la ubicación geográfica los datos de reflectancia fueron diferentes ( $F = 12.622$ ,  $gl = 3,69$   $P = 0.000$ ). Con la prueba de Duncan, se determinó que los datos de reflectancia del cultivo del sorgo en Estado de Tamaulipas fueron significativamente menores ( $\mu = 0.3387a$ ), seguida de Michoacán ( $\mu = 0.4103b$ ), Guanajuato ( $\mu = 0.4334b$ ) y finalmente Baja California ( $\mu = 0.4561b$ ). El comportamiento espectro electromagnético en el cultivo del Sorgo los datos que presentan más confiabilidad son por región geográfica.

**Palabras clave:** *Sorghum bicolor* (L) Moench, espectro electromagnético, Biblioteca de firmas espectrales, espectro radiómetro, reflectancia



## I. INTRODUCCIÓN

Con el monitoreo, la evaluación, el mapeo y la ubicación geográfica de las superficies de los cultivos se logra coadyuvar en el manejo y la toma de decisiones en las actividades agrícolas y forestales en México. Por lo anterior, las curvas de reflectancia o firmas espectrales de los cultivos son una herramienta tecnológica de gran utilidad mediante el uso de la percepción remota, con aplicaciones relevantes para la estimación de las superficies sembradas, el desarrollo fenológico de los cultivos, la estimación del rendimiento de las especies cultivadas, el monitoreo del estrés, la afectación por factores climáticos, por la sequía, por la presencia de plagas, la proliferación de enfermedades y la estimación de la biomasa vegetal, obteniendo como resultado la generación de información para la administración de los recursos agua y suelo (Atzberger, 2013; Bautista, 2011; Panda *et al.*, 2010).

Con la obtención de las firmas espectrales de los cultivos agrícolas *in situ* y su posterior aplicación en las imágenes de satélite permite efectuar las evaluaciones con mayor periodicidad, que sean más confiables y con la suficiente precisión para realizar la planeación, la cuantificación de las superficies de las especies de interés agrícola, pecuario y forestal, por medio de los cuales se puede obtener la información espacial de las coberturas en el terreno con métodos cuantitativos, repetibles y de bajo costo (Hunt *et al.*, 2003)

Los rangos de la reflectancia tiene distintas aplicaciones en la agricultura como se ha mencionado anteriormente, esta propiedad se debe a que la firma espectral representa el comportamiento de un elemento en las diferentes porciones del espectro electromagnético, la cual depende de múltiples factores como: el estado fenológico de las plantas, el contenido de humedad, entre otros (Teena y Manickavasagan, 2014).

La identificación y el almacenamiento de firmas espectrales en la biblioteca permite evaluar la composición de las especies, la estructura y la función de los cultivos. Lo anterior proporciona la validez en los procesos de clasificación supervisada y no supervisada en las imágenes de satélite, con la finalidad de generar conocimiento en

cuanto a las condiciones de sanidad, de estrés hídrico, presencia de plagas y la condición actual de la nutrición de los cultivos regionales (Briske *et al.*, 2008).

El empleo de la biblioteca ha surgido como un método automatizado para la exploración de los detalles más finos en la percepción remota, es una herramienta potencial para la clasificación de los cultivos agrícolas con la reflectancia, por lo tanto los resultados de las investigaciones de Nidamanuri y Zbell (2011) indican la existencia de una correlación significativa entre la imagen satelital y la firma espectral para algunos de los cultivos.

Es necesario evaluar la composición de las especies de uso agropecuario, su estructura y función por medio de clasificación y con el uso en campo del espectro radiómetro para registrar el comportamiento espectral. Con la identificación y caracterización de las firmas espectrales durante la fenología de los cultivos y la vegetación natural, se puede conocer el estado nutrimental, la presencia de plagas, las afectaciones por los incendios, el índice y temporalidad de la sequía, las afectaciones por inundación, entre otras (Mullla, 2013; Smith *et al.*, 2014). Por lo tanto, es fundamental el desarrollo de técnicas que permitan detectar, separar y cuantificar la distribución espacial del comportamiento espectral en los tipos de cobertura vegetal de uso agropecuario.

La finalidad de evaluar la confiabilidad de los registros de reflectancia para la clasificación supervisada de la cobertura vegetal en imágenes de satélite, utilizando una biblioteca de firmas espectrales, se justifica por los altos costos que implica su implementación a nivel nacional por la adquisición de un equipo de espectro radiómetro y su operación. Por lo tanto, una alternativa disponible es el empleo de los datos públicos generados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) actualmente Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER).

## **1.1. Justificación**

Contar con la biblioteca de firmas espectrales que permita evaluar la composición de las especies, la estructura, la función de los cultivos y de las especies de vegetación natural, ayuda a dar validez en los procesos de clasificación supervisada y no supervisada con la finalidad de generar conocimiento en cuanto a las condiciones de sanidad, de estrés hídrico, presencia de plagas y la condición actual de la nutrición de los cultivos como el sorgo forrajero (Briske *et al.*, 2008).

El presente estudio permitirá medir el espectro electromagnético del cultivo de sorgo, para identificar las condiciones actuales y su utilización en las proyecciones de la presencia de fenómenos como plagas, enfermedades, sequía, la degradación del suelo y otros factores que afectan, además de situaciones de importancia como la presencia de los productos químicos que se aplican para el control de plagas y malezas, su posible afectación en el ecosistema con la finalidad poder tomar decisiones pertinentes en el manejo de los cultivos y de las áreas de vegetación natural. Por lo tanto, es fundamental el desarrollo de conocimientos que permitan detectar, separar y cuantificar la distribución espacial del comportamiento espectral en los tipos de cobertura vegetal de uso agropecuario.

## **1.2. Objetivo General**

Caracterizar las combinaciones de las radiaciones electromagnéticas, en distintas longitudes de onda, que reflejan la cobertura del cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* (L) Moench) de acuerdo con su etapa fenológica y con su ubicación geográfica.

## **1.3. 1.3. Objetivos Específicos**

- Analizar el comportamiento de las firmas espectrales de las especies vegetales a partir de los datos obtenidos en campo.
- Comparar las firmas espectrales del cultivo de sorgo obtenidas en diferentes etapas fenológicas y con su ubicación geográfica a nivel nacional.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Definiciones y términos

#### 2.1.1. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es la distribución de **energías** de las radiaciones electromagnéticas. Se puede expresar en términos de energía, aunque más comúnmente se hace en términos de la longitud de onda y frecuencias de las radiaciones. Se extiende desde las radiaciones con menor longitud de onda (los rayos gamma) hasta las de mayor longitud de onda (las ondas de radio) (Figura 1).

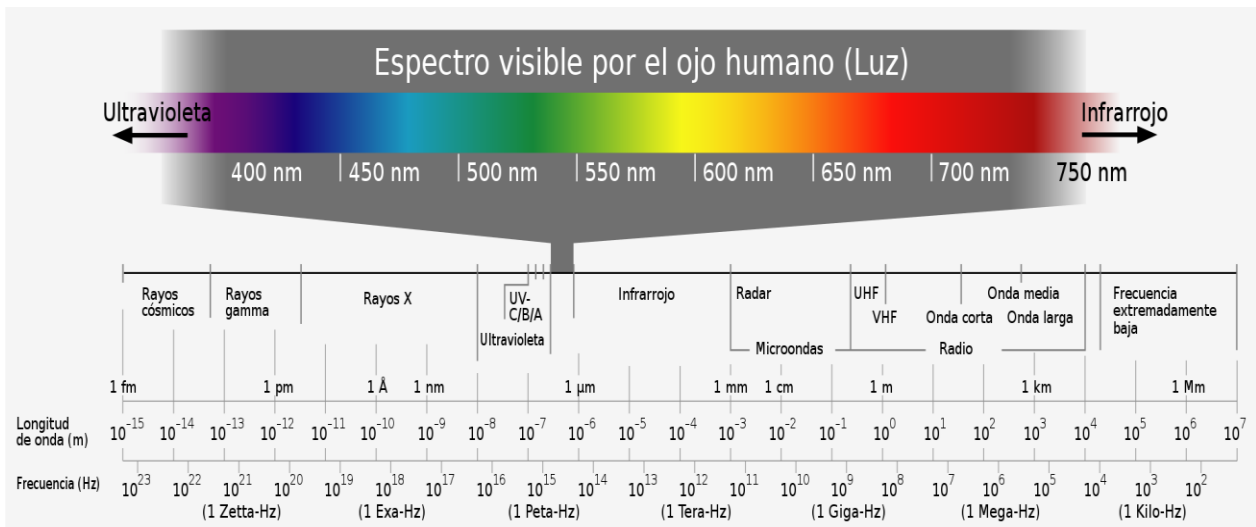


Figura 1. Espectro electromagnético.

En México se están generando metodologías propias para el estudio del territorio nacional, para ello es necesario validar la confiabilidad de dichas metodologías, en la clasificación de uso de suelo y vegetación. Por ejemplo, en un estudio realizado en la cuenca oriental del Valle de México, mediante el proceso de clasificación, se obtuvo 75% de precisión en las imágenes del sensor Landsat TM2-TM5-TM7, con el 69.07% las imágenes del sensor Landsat TM3-TM4-TM5 y finalmente las imágenes SPOT XS1-XS2-XS3 con una precisión de 69.07% (Rodríguez *et al.*, 2002).

Con la finalidad de generar herramientas importantes para la medición de variables biofísicas del bosque, a un costo menor que el inventario forestal tradicional y en escalas espaciales y temporales mayores, se realizó un estudio en el estado de Hidalgo en el cual se evaluó la vegetación natural, utilizando los sensores remotos en combinación con métodos de análisis geoespacial con imágenes SPOT para estimar el área basal, el volumen maderable y la cobertura arbórea en los bosques templados y mesófilos, obteniéndose intervalos de confianza del 95% (Muñoz-Ruiz *et al.*, 2014).

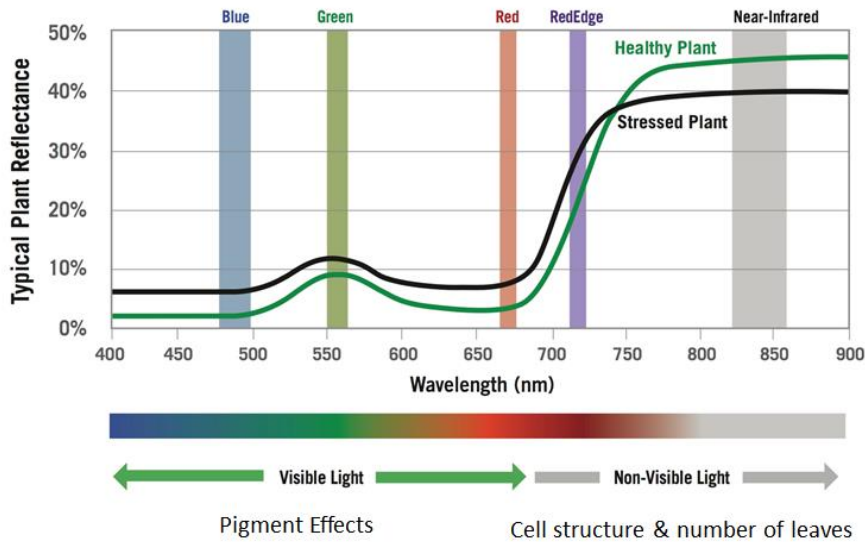
Se recomienda el uso de las imágenes de satélite de alta resolución como una alternativa viable en la planificación de las actividades forestales, en contraparte con el empleo de imágenes de baja resolución como MODIS para la elaboración de la división dasocrática en un área forestal, ya que estas últimas puede ocasionar una baja precisión en la determinación de superficies arboladas con potencial comercial, lo cual repercute en una sobrestimación de los recursos y por consiguiente una mayor presión sobre el bosque y un desequilibrio económico entre el valor de los productos forestales reales y la inversión en infraestructura vial que se requiere en los predios para la extracción de los productos del bosque (Ancira-Sánchez y Treviño, 2015).

En cuanto a su uso en la identificación y seguimiento de la sequía, que es un fenómeno que afectan a los cultivos y la vegetación natural en esta región, en la India se evaluó la sequía agrícola en algodón y sorgo en desarrollo, usando imágenes MODIS e índices de vegetación y permitió identificar el estrés hídrico a las que están sometidas las plantas (Chandrasekar y Sesha, 2015).

Los datos obtenidos con la evaluación de la sequía, mediante percepción remota, indican que puede ser útil realizar el manejo de la humedad superficial a 10 cm o riego para generación de mapas, basados en una mayor resolución temporal y espacial mediante la generación de índices de sequía y por tanto puede servir como una herramienta eficaz en el monitoreo y vigilancia de la sequía en tiempo real como el caso de China (Zhang *et al.*, 2013).

### 2.1.2. Firmas Espectrales

Todo cultivo posee una distribución única de radiación electromagnética que puede ser reflejada, transmitida o absorbida. La firma o huella espectral de cada cultivo presenta una reflectancia influenciada por características morfológicas, fisiológicas o por efecto del déficit de humedad. En otras palabras, la firma espectral es distinta según las longitudes de onda y propiedades espectrales de las plantas (Figura 2).



**Figura 2.** Reflectancia en los cultivos y su rango

La principal fuente de energía del planeta proviene del Sol. Esta energía, de la cual la luz visible forma parte y resulta más familiar, es la radiación electromagnética que llega a un objeto, la cual puede ser reflejada, absorbida o transmitida. Con ello es posible identificar los objetos de acuerdo a sus propiedades espectrales. La cantidad de energía que refleja, transmite o absorbe cada objeto es diferente para cada longitud de onda (Bautista, 2011).

La percepción remota se basa en la interacción del espectro electromagnético y la cubierta terrestre. Cuando se realiza un gráfico en que se representa la cantidad de radiación reflejada por una superficie y se relaciona con la longitud de onda electromagnética, se obtiene lo que se denomina firma espectral.

El comportamiento espectral de la vegetación depende fuertemente de las propiedades de las hojas, su orientación y la estructura del follaje de la vegetación. La proporción de la radiación que es reflejada, en las diferentes partes del espectro o patrón de reflectancia depende de la pigmentación de la hoja, el grosor, la composición o estructura celular y la cantidad de agua libre dentro del tejido foliar. Dado que estos parámetros varían de la especie y con el tiempo, el patrón espectral de las hojas presenta una gran variación (Bautista, 2011)

Las plantas adultas y sanas en el espectro visible se caracterizan por una fuerte absorción que es una baja reflectancia en el azul (400-500 nm), un incremento en la reflectancia en el verde (500-600 nm) y no excede de 20% del total de la radiación incidente. La absorción en el rojo (600-700 nm), con una fuerte reflectancia y transmitancia (50%) en la meseta del infrarrojo cercano (NIR) de 700 a 1,500 nm.

La respuesta en reflectancia en la región de 400-700 nm está regulada por el efecto y el comportamiento de las clorofilas, los carotenos ( $\alpha$ ,  $\beta$ -caroteno y xantofilas) y las antocianinas que son pigmentos rojos de las plantas, que previenen el foto-envejecimiento y la foto-inhibición a través de la absorción de la radiación solar excesiva, que de otro modo sería absorbida por los pigmentos de los cloroplastos, que son mayormente abundantes en hojas juveniles, se localizan en las vacuolas celulares debajo de la epidermis adaxial, parénquima en empalizada y el mesófilo esponjoso (Hunt *et al.*, 2012).

### **2.1.3. Reflectancia, absorbancia y transmitancia**

La reflectancia, absorbancia y transmitancia son fenómenos de la radiación que ingresa al planeta Tierra. La luz de la iluminación incide directa o indirectamente sobre la cubierta de un objeto, donde la porción de la luz es absorbida. Donde la porción no absorbida de la luz es remitida y constituye el estímulo cromático captado por los ojos del observador, denominado reflectancia. Finalmente, el resto de luz no absorbida es remitida, llegando como estímulo cromático a la superficie sensible del cuerpo humano (Fraenza *et al.*, 2013).

#### 2.1.4. Equipo y Unidades de medida

El espectro-radiómetro es un instrumento que mide la radiación de luz entrante, es decir, permite medir la intensidad cuantitativa o absoluta en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Es una herramienta efectiva para obtener datos *in situ* sobre las características particulares de un cultivo, suelo o condición del suelo, como por ejemplo salinidad, daños por estrés, entre otras características. El uso de un espectro-radiómetro en cultivos agrícolas robustece los esfuerzos encaminados a la estimación de superficies, así como la detección de cultivos de interés y se confirma como un auxiliar en la diferenciación de los cultivos (Pág. Web 1).

Las unidades de medida para reflectancia, absorbancia y transmitancia se miden con la longitud de onda electromagnética en nanómetro (nm).

La energía visible puede concebirse como una onda que se desplaza en el espacio. Desde luego, su velocidad de desplazamiento a 300.000 km/s, es muy superior a la velocidad de las ondas que se desplazan en la superficie de un estanque sobre el que se ha arrojado una piedra. Sin embargo, ambos tipos de onda tienen muchas características en común y pueden especificarse, ambas, en términos de estos mismos parámetros recién mencionados.

Existiendo una escala continua de radiación electromagnética que va desde una fracción de un nanómetro (nm) hasta mil kilómetros: los rayos gama, rayos alfa, rayos x, luz, rayos de calor, televisión, radio, fuerza eléctrica, etc. Estas radiaciones energéticas se diferencian en la frecuencia y longitud de sus ondas. Las radiaciones cuyas frecuencias se disponen en el rango situado entre los 400 y los 700 nanómetros se llaman luz, porque estimulan nuestra visión. Las radiaciones de diversa longitud de onda o los compuestos de radiaciones diversas en su longitud de onda son registrados o interpretados en nuestro órgano de la visión como colores diversos (Fraenza *et al.*, 2013).



## 2.2. Imágenes de satélite

El uso de imágenes de satélite en la actualidad tiene una mayor aplicación. El interés de contar con imágenes de mejor calidad y resolución es una demanda constante, con el fin de utilizarlas para evaluar la condición del suelo en tiempo real, para detectar las deficiencias nutricionales de las plantas, la presencia y afectación de plagas de los cultivos, entre otras (Mulla, 2013).

El uso de técnicas de reflectancia espectral para la agricultura es útil para el manejo y monitoreo de la producción de cereales, con ello se logra identificar y cuantificar las cubiertas vegetales, monitorear el suelo desnudo, determinar las condiciones de nutrición, la deficiencia de nitrógeno, la presencia de plagas y enfermedades, además de las condiciones de la vegetación de los ecosistemas naturales. Esta técnica es adecuada solo hasta que el cultivo o el estrato herbáceo o arbustivo tenga una cobertura mayor del 50% en el suelo, para ello es importante que los cultivos se evalúen en el ciclo fenológico, es conveniente utilizar sensores que puedan medir otros parámetros del cultivo en paralelo con la medición de la reflectancia espectral (Scotford y Miller, 2005).

El uso de imágenes de alta resolución y la obtención de las características espectrales de las especies vegetales, con técnicas avanzadas de procesamiento permiten, de forma rápida y a un bajo costo, lograr la diferenciación de árboles frutales con respecto a la vegetación natural. También permiten delimitar la variación espacial de los cultivos anuales y perennes, además de clasificar las áreas de bosques y arbustos, con los resultados generados se puede ayudar a tomar decisiones en la agricultura y en el manejo de los recursos naturales (Panda *et al.*, 2010).

El uso de imágenes Landsat 8 ha permitido obtener información de las condiciones de la Tierra, mediante herramientas como; la superficie de reflectancia, el albedo de la superficie, la temperatura de la superficie terrestre, la evapotranspiración, la sequía en la agricultura, la cobertura vegetal del suelo, la condición, la perturbación y el cambio de utilización de áreas agrícolas o naturales, lo que facilita la gestión de los recursos naturales, del clima y los estudios del cambio global (Roy *et al.*, 2014).

La aplicación de las imágenes, para estimar el contenido de clorofila en las plantas mediante el índice de área de vegetación normalizado (IAVN), se puede realizar utilizando solamente dos bandas en las regiones rojo e infrarrojo cercano del espectro medio, obteniendo resultados con coeficientes de correlación lineal con valores  $\geq 0,97$  (Chehdi *et al.*, 2014), lo que muestra la flexibilidad del uso de las imágenes de satélite.

### **2.3. Clasificación digital**

La percepción remota ofrece posibilidades de mejorar la cobertura espacial y temática en la evaluación de la utilización del suelo y la vegetación a nivel regional y mundial. Las propiedades del suelo se han deducido a partir de datos ópticos y de microondas utilizando métodos empíricos y de base física. Las imágenes pueden apoyar la interpolación espacial de baja densidad de las propiedades del suelo, se ha usado en zonas con escasa vegetación, teniendo una exitosa utilidad en el espacio geográfico, en las evaluaciones *in situ*.

Los procesos más utilizados son la clasificación, la regresión y el método de interpolación conocido como Kriging, con el uso de las herramientas permite conocer las condiciones de las áreas con uso de suelo y vegetación donde no se cuentan datos, con ello se puede obtener la cobertura de vegetación de áreas agrícolas y de pastoreo sin necesidad de recorrer todas las áreas de producción agropecuaria. Los métodos y las técnicas actuales aún tienen potencial para explorar más a fondo toda la gama de las firmas espectrales, propiedades espaciales y temporales de las fuentes de datos existentes (Mulder *et al.*, 2011).

### **2.4. Biblioteca de Firmas Espectrales**

La búsqueda en la biblioteca de firmas espectrales ha surgido como un método automatizado para la exploración de los detalles más finos en la percepción remota, presenta un potencial en clasificación de diversos cultivos agrícolas mediante el uso de imágenes de satélite, tiene aplicación en la clasificación supervisada mediante píxeles y por campo de imagen hiperespectral. Los resultados indican la existencia de una correlación significativa de adaptación espectral entre la imagen y la reflectancia espectral en la biblioteca para algunos de los cultivos, mostrando su potencial para la

transferencia de las bibliotecas espectrales de reflectancia para su utilización en la clasificación de especies de cultivos y en la vegetación natural (Nidamanuri y Zbell, 2011).

La generación de curvas espectrales, como el caso de Software for the Processing and Interpretation of Remotely sensed Image Time Series (SPIRITS), que es una caja de herramientas independiente y gratuita desarrollada para vigilancia del ambiente, en particular para producir información clara y basada en la evidencia para la producción agrícola analistas y tomadores de decisiones. Dada la fuerte variabilidad por año, el aumento de la competencia por los recursos naturales y el cambio climático tiene impactos en la agricultura, el monitoreo de cultivos mundial y las condiciones de vegetación natural es de gran relevancia, especialmente en las zonas con inseguridad alimentaria. Los datos de series de imágenes de teledetección durante amplio periodos de tiempo y baja resolución espacial pueden facilitar en este seguimiento, ya que proporcionan información clave en tiempo casi real en grandes áreas (Eerens *et al.*, 2014).

## **2.5. Sorghum bicolor (L) Moench**

### **2.5.1. Origen**

África ecuatorial se ha considerado como centro de origen donde existen especies silvestres y cultivadas de sorgo; se estima que se cultivó por primera vez en Etiopía entre 5,000 a 7,000 años (Pereira, 2011). Existe diferencias en cuanto a el tiempo de domesticación, de acuerdo a la Arque botánica donde los rastros muestran que se domesticó entre los 2000 a 1700 A.C. a partir del cual este grano se ha convertido en alimento humano y animal (Venkateswaran *et al.*, 2019).

En África se encuentra la mayor variabilidad y riqueza genética de ecotipos de sorgo, destaca Kenia donde se reúnen conocimientos ancestrales de los productores y la riqueza de sorgo silvestre, como maleza y cultivado (Mutegi *et al.*, 2010). El sorgo moderno fue cultivado a partir de plantas nativas considerados como zacates usados en forraje, la domesticación permitió que las semillas perdieran latencia y se fomentara un aumento en el tamaño del grano hace 3,000 y 4,000 años (Winchell *et al.*, 2018).

### 2.5.2. Clasificación taxonómica

El sorgo pertenece al reino *Plantae*, división *Magnoliophyta*, clase *Liliopsida*, orden *Cyperales*, familia *Poaceae*, tribu *Andropogoneae*, subtribu *Sorghinae* y género *Sorghum* (Hariprasanna y Patil, 2015).

### 2.5.3. Importancia del sorgo

El sorgo es un cultivo importante como alimento básico por su buena calidad nutricional, con contenidos de proteína de 4 hasta 22%, que representa una opción para los humanos que habitan los trópicos semiáridos de África y Asia (Ratnavathi y Patil, 2013). Es un cultivo trascendental de las zonas áridas, establecido en suelos marginales y una fuente de alimento, forraje y actualmente como biocombustible (Hariprasanna y Patil, 2015).

Estados Unidos es el país con mayor producción de sorgo a nivel mundial, Kansas, Texas, Colorado, Oklahoma y South Dakota producen el 90% del volumen de grano utilizado para alimentación, nutrición animal y biocombustible (McGinnis y Painter, 2020). Este grano es indispensable en la ganadería para la producción de bovinos, en forma de grano o ensilaje proporcionando energía a las dietas de los animales (Malau-Aduli y Holman, 2014).

Más recientemente, los cultivares de sorgo tropical han atraído mucha atención como cosecha de biocombustibles celulósicos. Los programas de mejoramiento de sorgo en todo el mundo trabajando hacia variedades mejoradas con mejor calidad, resistencia a enfermedades, tolerancia a la sequía y características agronómicas (Mace *et al.*, 2009).

El sorgo a nivel de comercialización, donde Estados Unidos de América y México consumen el 80% de la producción mundial principalmente para la industria pecuaria (Mundia *et al.*, 2019).

En México, los estados productores de sorgo son Tamaulipas, Guanajuato, Sinaloa, Michoacán y Jalisco, una característica de la siembra de sorgo que sus costos de producción son bajos, se obtiene buen rendimiento y sus requerimientos hídricos son bajos (SIAP, 2017).

#### **2.5.4. Utilización del sorgo**

De las 22 especies que componen este género altamente variable, solo uno, *Sorghum bicolor*, se cultiva comercialmente como alimento, forraje y producción de bioenergía (Venkateswaran, *et al.*, 2019).

El sorgo es un cultivo con múltiples usos a nivel mundial como alimento, forraje, combustible y fibra. El grano de sorgo es el ingrediente principal en la alimentación del ganado, aves de corral y cerdos en todo el mundo. Es una fuente importante de forraje tanto para animales productores de leche y de tiro en sistemas mixtos de cultivo y ganado.

El sorgo proporciona materia prima para muchos usos industriales como alcohol potable, malta de etanol de grado de transporte, cerveza, líquidos, papillas, almidón, adhesivos, aglutinantes de núcleos para fundición de metales, refinado de minerales y sémola como material para embalaje. En otras partes del mundo, se utiliza tanto para alimentos como para piensos y como fuente de materiales de construcción.

Recientemente, se ha promocionado como materia prima para la producción de etanol celulósico. Esta versatilidad se debe al hecho que produce granos almidonados en su panícula, jugo azucarado en su tallo, que pueden ser altamente celulósicos y hacer del tallo una materia prima ideal y materiales de construcción (Wang *et al.*, 2014).

#### **2.5.5. Fenología del Sorgo**

El crecimiento del sorgo no es muy rápido hasta los 15 cm de altura, cuando la planta ya tiene establecido el sistema de raíces y comienza a absorber los nutrientes más rápidamente.

**Etapa Emergencia.** Ocurre cuando el coleóptilo es visible en la superficie del suelo, que es por lo general 3 a 10 días después de la siembra.

**Etapa estado de tres hojas.** La etapa de tres hojas se produce cuando las l gulas de tres hojas se pueden ver sin tener que romper la planta. Esta etapa se produce aproximadamente 10 días después de la emergencia, dependiendo de la temperatura.

**Etapa de 5 hojas.** Se produce cuando las l gulas de cinco hojas se pueden ver sin la necesidad de romper la planta, y se produce cerca de tres semanas después de la emergencia. El sistema radical se desarrolla rápidamente en esta etapa, la materia seca se acumula a una velocidad constante con condiciones de crecimiento satisfactoria. Durante esta etapa se determina el desarrollo potencial, ya que se establece el número total de hojas que tendrá.

**Etapa diferenciación del punto de crecimiento.** Es el punto de crecimiento de la planta cambio de vegetativo a reproductivo, cuando la planta alcanza el 5% de su crecimiento total y con el 10-15% de todos los nutrientes que tomara durante el ciclo. A partir de este momento se define el tamaño potencial de la panoja. Esta etapa se produce 30 días después de la emergencia, cuando el cultivo ha llegado a un tercio ciclo.

**Etapa última hoja visible.** Todas las hojas, excepto las últimas 3 o 4 hojas se han expandido totalmente, es decir, se ha determinado el 80% del área foliar. Las últimas 2-5 hojas inferiores se han perdidos.

**Etapa panoja embuchada.** Todas las hojas se han expandido totalmente, lo que se significa que la planta se encuentra en sus niveles máximos de área foliar e intercepción de la luz. El tamaño potencial de la panoja se ha determinado y la misma se encuentra embuchado en la vaina de la hoja bandera.

**Etapa 50% de floración.** Se define cuando la mitad de las plantas están en la etapa de floración, la cual comienza en la parte superior de la panoja, y baja en 4-9 días. En esta etapa la planta ha formado la mitad el peso total. El cultivo ha cumplido el 60% del tiempo total entre la siembra y madurez fisiológica. A partir de este momento la producción de foto asimilados se destina exclusivamente al grano, los fotosintatos almacenados en el tallo también se mueven hacia el grano.

**Etapa grano pastoso.** El grano tiene una consistencia pastosa y el llenado de grano se produce rápidamente. La mitad del peso seco del grano se acumula en las etapas 6 y 7. Las hojas inferiores siguen envejeciendo, entre 8 a 12 hojas mueren en esta etapa.

**Etapa grano duro.** Se alcanza las  $\frac{3}{4}$  partes del peso seco del grano. La absorción de nutrientes en este momento es prácticamente nula, un estrés hídrico severo, así como una helada temprana se traduciría en un grano vacío.

**Etapa madurez fisiológica.** Se alcanza el máximo peso de la planta. En los granos se forma un punto oscuro. La humedad del grano depende del híbrido con valores que oscilan entre el 25% y 35%. Esta madurez fisiológica no es la madurez de la cosecha, ya que el grano debe perder humedad antes de ser cosechado para un almacenamiento convencional. En cambio, si lo que se busca es un grano húmedo, o cosechar temprano para luego hacer un secado artificial, el sorgo se puede cosechar en cualquier momento a partir de esta etapa.

### 2.5.6. Producción mundial

En el año de 2019 el censo de producción mundial del de sorgo llegó a 57,893,378 toneladas en 40,074,667 hectáreas cosechadas (Pág. Web 2).

La región continental que tuvo la mayor producción de sorgo entre los años 1961 y 2019 fue América seguido de África, Asia, Oceanía y Europa.

*Cuadro 1.* Producción de sorgo por región

Área	Producción (toneladas)
África	17,289,821.2
América	25,331,177.9
Asia	15,264,996.1
Europa	703,395.86
Oceanía	1,281,154.22

Fuente: FAOSTAT, 2020, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>.

Actualmente Estados Unidos tiene la mayor producción total de sorgo del mundo, seguida de India, Nigeria, China continental, México, Sudan, Argentina, Etiopía, Sudan (ex) y Australia con una producción global promedio de 53 megatonnes por año (Pág. Web 2).

*Cuadro 2.* Los principales países productores de sorgo.

Área	Producción (Toneladas)
Estados Unidos de América	15,157,075.02
India	8,740,213.39
Nigeria	5,486,238.24
China, Continental	5,339,202.42
México	4,572,762.54
Sudán	4,457,729.13
Argentina	3,438,795.25
Etiopía	2,705,313.04
Sudán (ex)	2,603,556.76
Australia	1,278,602.86

Fuente: FAOSTAT, 2020. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>.



La producción media de sorgo entre los años 1961 y 2019 fue de 3,532,362,172 toneladas de las 2,661,222,399 hectáreas (2020).

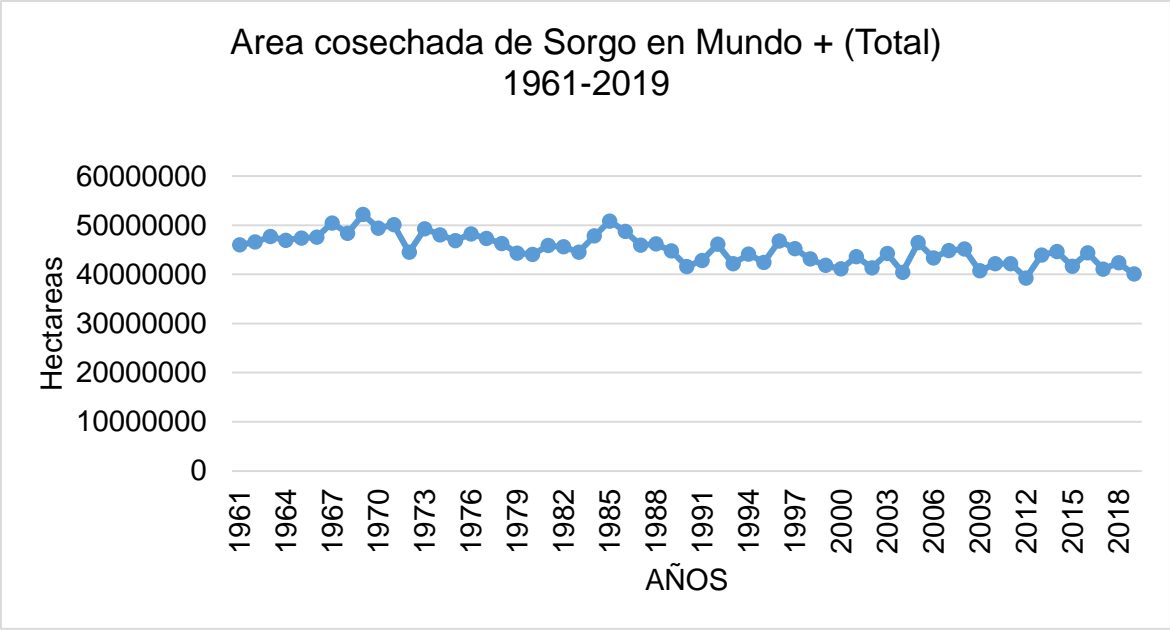


Figura 3. Hectáreas cosechadas de sorgo en el mundo entre los años 1961 y 2019.

Fuente: FAOSTAT, 2020, <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize>.

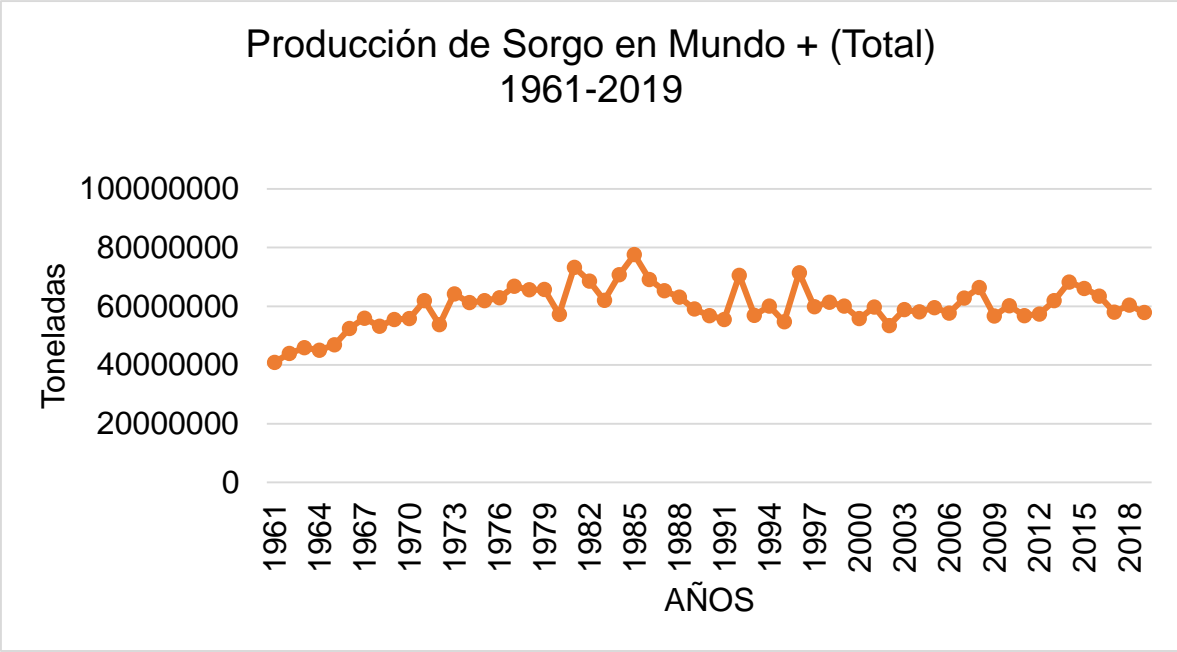


Figura 4. Hectáreas cosechadas de sorgo en el mundo entre los años 1961 y 2019.

### 2.5.7. Producción Nacional

México es el cuarto país en el mundo en la producción de sorgo; es el noveno cultivo que más se produce, la producción media total de sorgo que se registró en el año 2019 fue de 4,352,947 toneladas de las 1,324,783 hectáreas (2020).

**Cuadro 3.** Producción y rendimiento de sorgo total en México del año 2019.

	Unidad	Valor
Área cosechada	ha	1,324,783
Producción	toneladas	4,352,947

Fuente: FAOSTAT, 2020, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>.

De acuerdo con el INEGI en el año 2019 el censo de la superficie total sembrada de sorgo en grano en México fue de 1,411,676.3 hectáreas con una producción de 3,671,068 toneladas, siendo éste el cuarto cultivo más sembrado en superficie y en producción en toneladas (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Superficie total sembrada por cultivo anual en México del año 2019.

Cultivo	Superficie total sembrada Hectáreas	<i>Producción total</i> Toneladas
Maíz grano blanco	6,672,098.2	25,811,328.1
Frijol	1,788,816.7	5,400,839.4
Maíz grano amarillo	1,534,965.5	3,735,122.9
Sorgo grano	1,411,676.3	3,671,068.0
Trigo grano	702,054.9	2,860,305.2

Soya	187,766.0	1,981,390.0
Chile	135,488.2	999,487.2
Calabaza	54,882.7	828,113.9
Cebolla	43,557.6	651,066.5
Jitomate (tomate rojo)	42,383.3	310,411.6
Arroz	26,867.9	157,432.7
Amaranto	4,226.9	5,352.5

*Nota.* Fuente: Adaptada de (INEGI, 2019), <https://www.inegi.org.mx/temas/agricultura/>.

Como se muestra en el cuadro 5, los principales estados productores en el ciclo primavera-verano son: Guanajuato, Michoacán y Sinaloa; mientras que en el otoño-invierno son: Tamaulipas, Nayarit y Campeche (ASERCA con datos de SIAP, estimado a diciembre de 2019).

**Cuadro 5.** Producción nacional (miles de toneladas) de sorgo del ciclo primavera-verano en los años 2018 a 2020.

Estados	2018/2019	2019/2020	%VAR anual (2018/2020)
Guanajuato	833	735	-11.8
Michoacán	328	291	-11.3
Sinaloa	291	250	-14.3
Otros	741	736	-0.7
Total	2194	2011	-8.3

Fuente: Adaptada de (ASERCA con datos de SIAP, estimado a diciembre de 2019).

**Cuadro 6.** Producción nacional de sorgo del ciclo otoño-invierno (miles de toneladas) en los años 2018 a 2020.

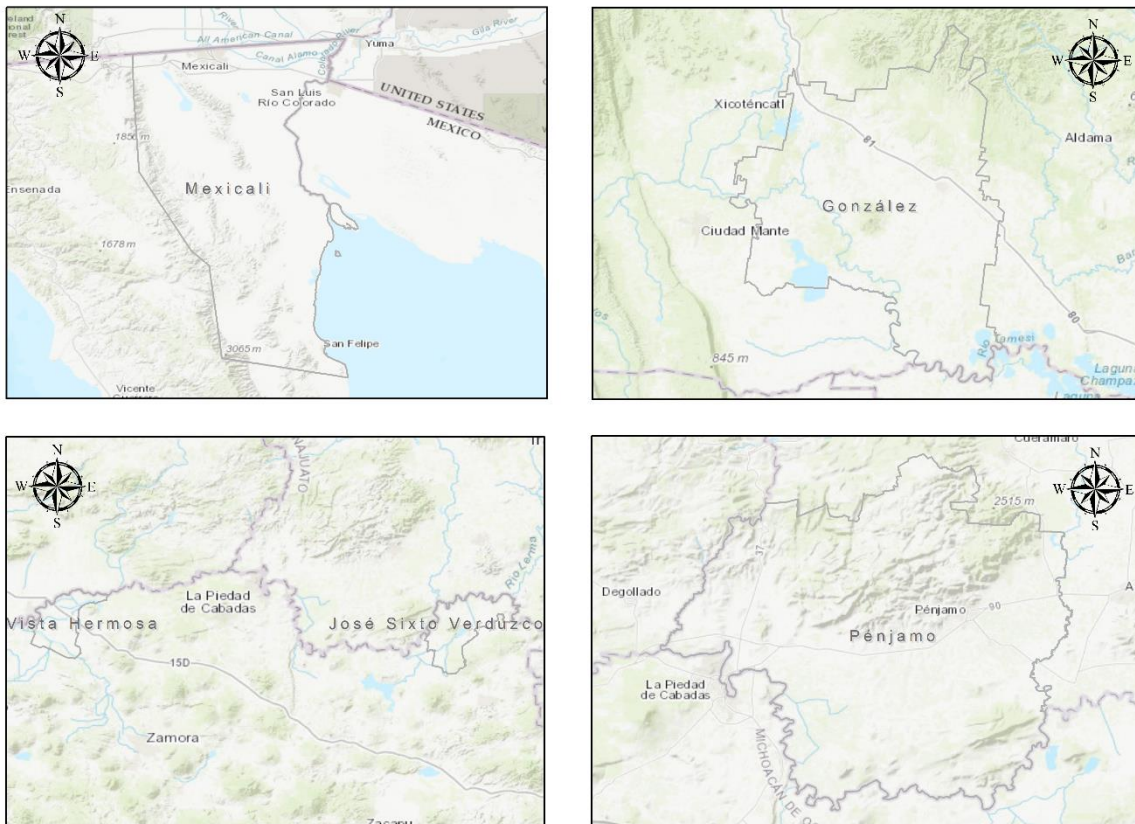
Estados	2018/2019	2019/2020	%VAR anual (2018/2020)
Tamaulipas	1776	2006	12.9
Nayarit	273	217	-20.4
Campeche	64	79	23.7
Otros	232	310	33.7
Total	2345	2612	11.4

Fuente: Adaptada de (ASERCA con datos de SIAP, estimado a diciembre de 2019).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Localización del área de estudio y datos de reflectancia

Los registros de la reflectancia se obtuvieron de la Biblioteca de firmas espectrales del SIAP de la SAGARPA, actualmente SADER. Estos datos se recolectaron en campo durante los meses de agosto y septiembre de 2014 en los estados de Guanajuato, Michoacán y Tamaulipas y en el mes de septiembre de 2015 en el caso del estado de Baja California. En la Figura 5 se muestran los municipios donde se realizaron las evaluaciones de campo.



**Figura 5.** Ubicación de los municipios en donde se realizaron las evaluaciones de campo, Mexicali en Baja California, González en Tamaulipas, Vista hermosa y José Sixto Verduzco en Michoacán y Pénjamo en Guanajuato.

Los datos que se obtuvieron del cultivo fueron la etapa fenológica, altura, ciclo productivo, modo hídrico: de temporal o de riego, la hora de registro, la ubicación geográfica, el estado del tiempo: despejado o nublado, y la fotografía del ejemplar. La reflectancia se registró con equipo portátil espectro radiómetro modelo PSR-1100-SN1374424 de *Spectral Evolution®*, con calibración radiométrica y rango de medición de longitud de onda de 300 a 1,100 nm (Figura 6). El procedimiento consistió en trasladarse a las parcelas con el cultivo, posteriormente en el centro de la parcela se seleccionó una planta de sorgo, se colocó el equipo en la hoja de la cual se obtienen los datos del comportamiento en el espectro radiométrico como se observa en la Figura 7.



**Figura 6.** Equipo portátil espectro radiómetro modelo PSR-1100-SN1374424



**Figura 7.** Registro de la reflectancia de hojas de la planta de sorgo.

### **3.2. Análisis estadístico**

Se muestrearon un total de 73 sitios. Los datos de reflectancia se procesaron en el programa Excel, para obtener la media. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor en el programa *PASW Statistics 18* de IBM®. En cuanto a la fenología de las plantas se evaluaron tres: el desarrollo vegetativo, la floración y la formación de panoja, la otra variable fue la ubicación geográfica en los cuatro estados: Guanajuato, Michoacán, Tamaulipas y Baja California. Finalmente, en en Excel y en el programa ENVI 5.3 de Harris® *Geoespatial Solutions* se realizó la conformación y almacenamiento de la biblioteca de firmas espectrales de sorgo por etapa fenológica y por localización geográfica.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

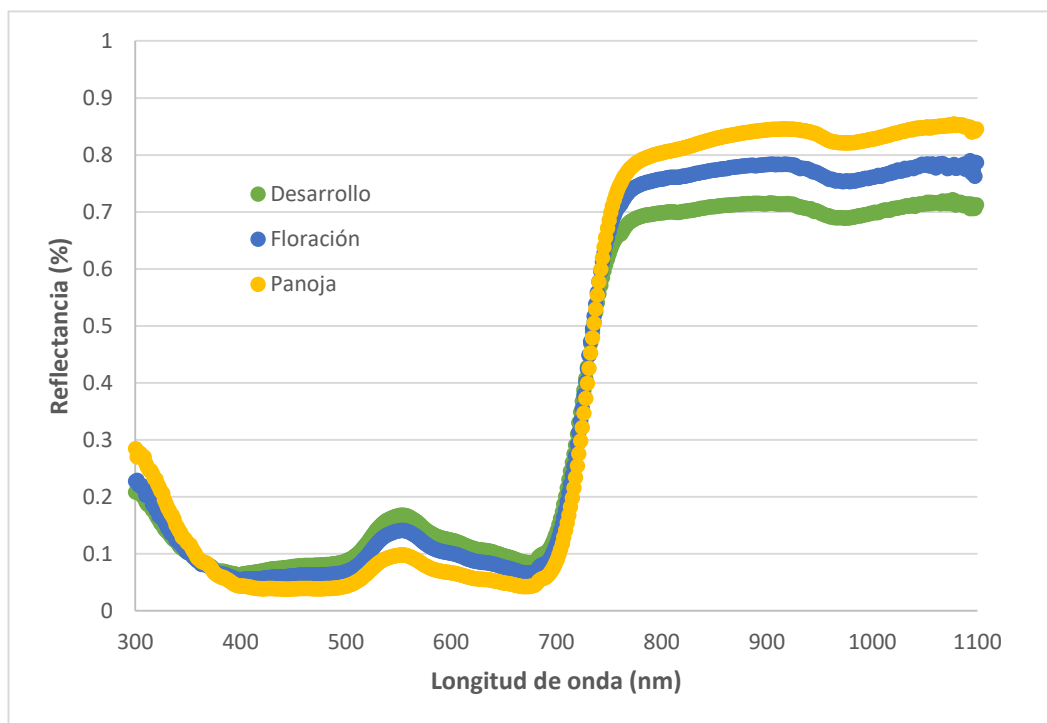
En la evaluación de las etapas fenológicas no se encontró diferencia entre los registros de reflectancia en las plantas de sorgo ( $F = 1.623$ ,  $gl = 2,70$   $P > 0.205$ ), por lo tanto, se observa que el comportamiento medio es homogéneo en la cantidad de luz que reflejan las hojas y que sugiere que la firma espectral puede usarse en cualquier estado fenológico del cultivo.

De acuerdo con Bautista, 2011, el comportamiento espectral de la vegetación depende fuertemente de las propiedades de las hojas, su orientación y la estructura del follaje de la vegetación, la proporción de la radiación que es reflejada, en las diferentes partes del espectro electromagnético (patrón) depende de la pigmentación de la hoja, el grosor y la composición (estructura celular) y la cantidad de agua libre dentro del tejido foliar. Por lo tanto, señalan que estos parámetros varían entre especies vegetales y con el tiempo, el patrón espectral de las hojas presenta una gran variación; de acuerdo con los datos procesados no presenta diferencias independientemente del estado de madurez de las plantas de sorgo.

En cuanto a la ubicación geográfica de los sitios de muestreo, los datos de reflectancia fueron diferentes ( $F = 12.622$ ,  $gl = 3,69$   $P = 0.000$ ). Derivado de la prueba de Duncan, se determinó que los datos de reflectancia del cultivo del sorgo en el estado de Tamaulipas fueron significativamente menores ( $\mu = 0.3387a$ ), seguido de Michoacán ( $\mu = 0.4103b$ ), Guanajuato ( $\mu = 0.4334b$ ) y finalmente Baja California ( $\mu = 0.4561b$ ). Por tanto, se recomienda usar las firmas espectrales por región geográfica para evitar sesgos en la clasificación en las imágenes de satélite.

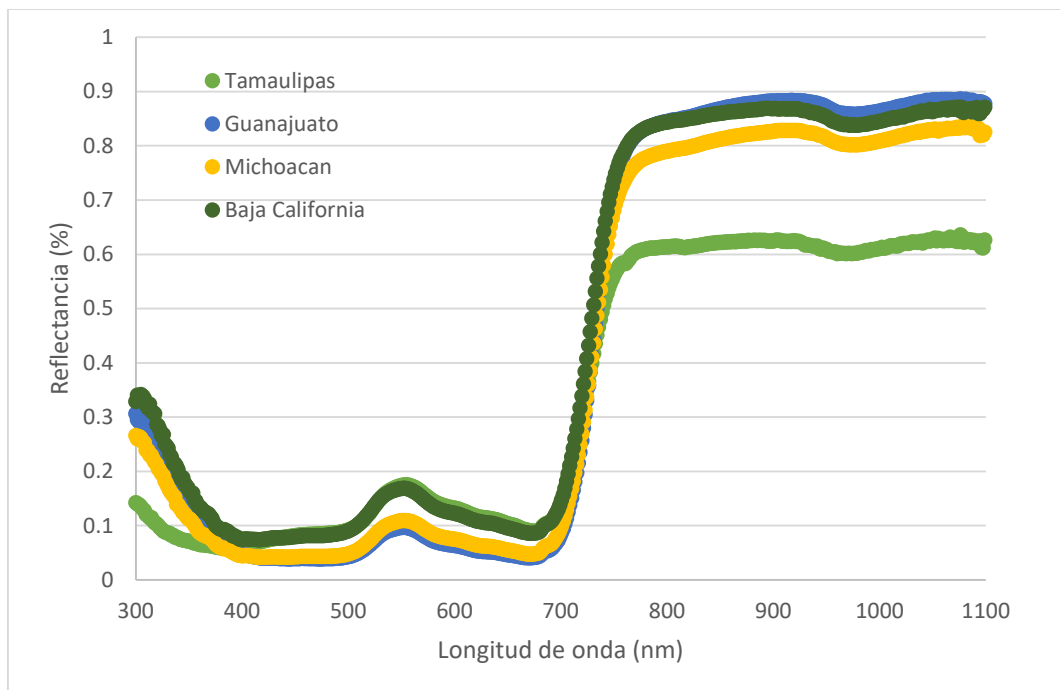
En cuanto al comportamiento de las curvas para el cultivo del sorgo, como se muestra en la Figura 8, tiene el comportamiento reportado por Hunt *et al.* (2012), donde se tiene una fuerte absorción (baja reflectancia) en el color azul, dentro del rango 400-500 nm, seguido de un incremento en la reflectancia en el color verde, de 500-600 nm, que no excede de 20% del total de la radiación incidente. La absorción en el color rojo (600-700 nm), con una fuerte reflectancia y transmitancia (50%) en la meseta del infrarrojo cercano (NIR) de 700 a 1,300 nm, en este caso el equipo utilizado tiene como límite 1,100 nm.





**Figura 8.** Comportamiento de la reflectancia de las hojas de sorgo por estado fenológico.

En cuanto a la respuesta de la reflectancia de los ejemplares de sorgo por ubicación en la República Mexicana, el comportamiento fue muy similar a estudios anteriores en la luz visible, la diferencia se observa en la Figura 9, donde la curva en el NIR la reflectancia es menor al 0.6%, mientras que en el resto de los estados es mayor la reflectancia hasta 0.9%, lo cual indica que en el estado de Tamaulipas hay más absorción de la energía en el NIR, de 700-1300 nm, se considera que la reflectancia está influenciada por propiedades estructurales de la hoja y del tallo, se considera generalmente que la reflectancia es alta en el NIR porque las hojas y las copas dispersan la energía infrarroja, además que la absorción está regulada por el comportamiento de pigmentos como las clorofilas, los carotenos ( $\alpha$ ,  $\beta$ -caroteno y xantofilas) y las antocianinas que son colores rojos de las plantas, que previenen el foto-envejecimiento y la foto-inhibición a través de la absorción de la radiación solar excesiva, que de otro modo sería absorbida por los pigmentos de los cloroplastos (Barton, 2012; Hunt *et al.*, 2012; Ollinger, 2011)



**Figura 9.** Comportamiento de la reflectancia de las hojas de sorgo por ubicación geográfica.

Finalmente se realizó la conformación de la biblioteca de firmas espectrales de sorgo por etapa fenológica y por localización, se realizó en el programa ENVI 5.2 (Exelis Visual Information Solutions), en la cual se integrarán las firmas espectrales para ser utilizadas en las etapas siguientes de clasificación de los cultivos.

## V. CONCLUSIONES

La identificación de las firmas espectrales o reflectancia en el cultivo del sorgo en distintas etapas fenológicas no presentaron diferencias, mientras que en cuanto a la ubicación geográfica si se presentaron diferencias. Lo anterior sugiere que puedan utilizarse el comportamiento espectral para la clasificación supervisada en imágenes de satélite a partir del estado fenológico de desarrollo del cultivo de sorgo. Es necesario evaluar el comportamiento espectral de otros cultivos con los que se tienen datos de campo en la biblioteca de firmas espectrales del SIAP.

## VI. LITERATURA CITADA

- Ancira-Sánchez, L., y Treviño, G. E. J. (2015). Utilización de imágenes de satélite en el manejo forestal del noreste de México. *Madera y Bosques*. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.211434>
- Atzberger, C. (2013). Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. In *Remote Sensing* (Vol. 5, Issue 2, pp. 949–981). <https://doi.org/10.3390/rs5020949>
- Barton, C. V. M. (2012). Advances in remote sensing of plant stress. *Plant and Soil*, 354(1–2), 41–44. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1051-0>
- Bautista, Z. F. (2011). Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales (Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México. 2da. ed. México. ISBN 978-607-02-2127-9.
- Briske, D. D., Derner, J. D., Brown, J. R., Fuhlendorf, S. D., Teague, W. R., Havstad, K. M., Gillen, R. L., Ash, A. J., yWillms, W. D. (2008). Rotational Grazing on Rangelands: Reconciliation of Perception and Experimental Evidence. *Rangeland Ecology yManagement*, 61(1), 3–17. <https://doi.org/10.2111/06-159R.1>
- Chandrasekar, K., y Sessa Sai, M. V. R. (2015). Monitoring of late-season agricultural drought in cotton-growing districts of Andhra Pradesh state, India, using vegetation, water and soil moisture indices. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1364-4>
- Chehdi, K., Soltani, M., Cariou, C. (2014). Pixel classification of large-size hyperspectral images by affinity propagation. *Journal of Applied Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.8.083567>
- Eerens, H., Haesen, D., Rembold, F., Urbano, F., Tote, C., y Bydekerke, L. (2014). Image time series processing for agriculture monitoring. *Environmental Modelling and Software*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.021>
- Fraenza, F., Yonahara, S., & Perié, A. (2013). *¿ Cómo vemos?: una introducción a la visión de la forma y el color*.
- Hariprasanna, K., Patil, J.V. (2015). Sorghum: origin, classification, biology and improvement. In: Madhusudhana R, Rajendrakumar P, Patil JV (eds) Sorghum molecular breeding. Springer, India, pp 3–22
- Hunt, Jr., E. R., Everitt, J. H., Ritchie, J. C., Moran, M. S., Booth, D. T., Anderson, G. L., Clark, P. E., y Seyfried, M. S. (2003). Applications and Research Using Remote Sensing for Rangeland Management. *Photogrammetric Engineering yRemote Sensing*, 69(6), 675–693. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.6.675>
- Hunt, E. R., Doraiswamy, P. C., McMurtrey, J. E., Daughtry, C. S. T., Perry, E. M., yAkhmedov, B. (2012). A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll

- content at the Canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21(1), 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.020>
- Mace, E. S., Rami, J. F., Bouchet, S., Klein, P. E., Klein, R. R., Kilian, A., ... & Jordan, D. R. (2009). A consensus genetic map of sorghum that integrates multiple component maps and high-throughput Diversity Array Technology (DART) markers. *BMC plant biology*, 9(1), 1-14.
- Malau-Aduli, A.E.O., Holman, B.W.B. (2014). World Beef Production, Beef Cattle Production and Trade, CSIRO Publishing, DJ Cottle, L Khan (ed), Victoria, Australia, pp. 65-80. ISBN 9780643109889 (2014) [Research Book Chapter]
- McGinnis, M. J., Painter, J. E. (2020). Sorghum: History, Use, and Health Benefits. *Nutrition Today*, 55(1). <https://doi.org/10.1097/NT.0000000000000391>
- Mulder, V. L., de Bruin, S., Schaepman, M. E., y Mayr, T. R. (2011). The use of remote sensing in soil and terrain mapping -A review. In *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.018>
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- Mundia, C. W., Secchi, S., Akamani, K., y Wang, G. (2019). A Regional Comparison of Factors Affecting Global Sorghum Production: The Case of North America, Asia and Africa's Sahel. *Sustainability*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/su11072135>
- Muñoz-Ruiz, M. A., Valdez-Lazalde, J. R., de los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., y Monterroso-Rivas, A. I. (2014). Inventario y mapeo del bosque templado de hidalgo, México mediante datos del satélite spot y de campo. *Agrociencia*.
- Mutegi, E., Sagnard, F., Muraya, M., Kanyenji, B., Rono, B., Mwongera, C., Marangu, C., Kamau, J., Parzies, H., de Villiers, S., Semagn, K., Traoré, P. S., y Labuschagne, M. (2010). Ecogeographical distribution of wild, weedy and cultivated Sorghum bicolor (L.) Moench in Kenya: Implications for conservation and crop-to-wild gene flow. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 57(2). <https://doi.org/10.1007/s10722-009-9466-7>
- Nidamanuri, R. R., y Zbell, B. (2011). Transferring spectral libraries of canopy reflectance for crop classification using hyperspectral remote sensing data. *Biosystems Engineering*, 110(3), 231–246. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.07.002>
- Ollinger, S. V. (2011). Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. In *New Phytologist* (Vol. 189, Issue 2, pp. 375–394). <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03536.x>
- Panda, S. S., Hoogenboom, G., y Paz, J. O. (2010). Remote sensing and geospatial technological applications for site-specific management of fruit and nut crops: A review. In *Remote Sensing* (Vol. 2, Issue 8, pp. 1973–1997). <https://doi.org/10.3390/rs2081973>

- Pereira, T. D. (2011). Sorghum: Cultivation, varieties and uses. In *Sorghum: Cultivation, Varieties and Uses*.
- Ratnavathi, C.V., Patil, J.V . (2013). Sorghum Utilization as Food. *Journal of Nutrition y Food Sciences*, 04(01). <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000247>
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., C.E., W., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., Kennedy, R., Scambos, T. A., Schaaf, C. B., Schott, J. R., Sheng, Y., Vermote, E. F., Belward, A. S., Bindschadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., ... Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- SIAP, 2017. Cuadernillo de la Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. SIAP-SADER. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256433/B\\_sico-Sorgo\\_Grano.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256433/B_sico-Sorgo_Grano.pdf)
- Scotford, I. M., y Miller, P. C. H. (2005). Applications of spectral reflectance techniques in northern European cereal production: A review. In *Biosystems Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.11.010>
- Teena, M., y Manickavasagan, A. (2014). Imaging with Electromagnetic Spectrum. In *Imaging with Electromagnetic Spectrum*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54888-8>
- Venkateswaran, K., Elangovan, M., y Sivaraj, N. (2019). Origin, domestication and diffusion of Sorghum bicolor. In *Breeding Sorghum for Diverse End Uses*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101879-8.00002-4>
- Wang, M., Chen, Y., Xia, X., Li, J., & Liu, J. (2014). Energy efficiency and environmental performance of bioethanol production from sweet sorghum stem based on life cycle analysis. *Bioresource technology*, 163, 74-81.
- Zhang, N., Hong, Y., Qin, Q., y Zhu, L. (2013). Evaluation of the visible and shortwave infrared drought index in China. *International Journal of Disaster Risk Science*. <https://doi.org/10.1007/s13753-013-0008-8>

## Páginas Web

- Página web 1. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/espectro-radiometro-herramienta-para-decisiones-agroalimentarias>. Fecha de consulta: 21/nov/2021.
- Página web 2. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize>. Fecha de consulta: 21/nov/2021.



## VII. ANEXOS



**Figura 8.** Etapa fenológica en desarrollo de sorgo en Tamaulipas



**Figura 9.** Etapa de floración en Michoacán.



**Figura 10.** Etapa de panoja en sorgo de temporal en el Estado de Guanajuato

**ARCHIVOS EN FORMATO EXCEL**

**Contiene los datos de reflectancia de los sitios**