

**FACULTAD DE  
CIENCIAS NATURALES Y AGROPECUARIAS**

**Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero  
Agrónomo**

**Autor: Danilo Martínez Domínguez**

**Título: Relación del índice de salinidad del suelo y el NDVI  
determinados mediante teledetección en la máquina No. 1  
del polo productivo “La Julia” del agroecosistema Mayarí,  
Holguín.**

**Tutores: Ing. Mirna Dayanis Martínez Domínguez**

**Ing. Roberto Alejandro García Reyes**

**Ms C. Juan Alejandro Villazón Gómez**

**Holguín 2022**

# *Agradecimientos*

- *A mi familia, por el apoyo brindado en especial a mi querida madre.*
- *Al claustro de profesores del departamento de Agronomía de la CUM Mayarí.*
- *A la Revolución*

*Dedicatoria.*

*A mis padres y hermana.*

## RESUMEN

La salinidad del suelo es uno de los problemas de degradación del suelo que afecta las áreas de producción agropecuarias en el mundo, y Cuba no está exenta a ello. Las técnicas de teledetección han sido ampliamente utilizadas en estudios de salinidad de los suelos brindando resultados que son validados con estudios de campo. El objetivo de la investigación fue determinar la relación de la salinidad del suelo, la topografía e índices de vegetación obtenidos mediante teledetección en un área bajo riego del agroecosistema Mayarí. Se obtuvo una imagen de la cuadrícula 011/046 del satélite Sentinel 2 del Servicio Geológico de los Estados Unidos, proyectada en la zona WGS 84 UTM Zona 18 N en el software QGIS 3.10 para el cálculo del índice espectral de salinidad y NDVI. En el software ArcGIS 10.5 se extrajeron 100 puntos aleatorios de los valores de cada área comprendida en cada imagen, y se procesaron en el software Statgraphics mediante análisis de regresión del índice salino y el NDVI. Los mapas temáticos muestran la presencia de zonas salinas con valores negativos de este índice mientras que el NDVI presentó áreas con escasa vegetación. El modelo obtenido mostró una dependencia lineal entre las variables con valores de coeficiente de determinación y correlación negativa cercanos al 100 %. Se constata la relación entre la salinidad del suelo con el NDVI, aun cuando se realizó un estudio utilizando técnicas de percepción remota la cual se puede utilizar en investigaciones de este tipo, para la toma de decisiones en el agroecosistema Mayarí.

## **ABSTRACT**

The salinity is one of the problems of degradation of the ground that affects the farming areas of production in the world, and Cuba is not free to it. The teledetección techniques widely have been used in studies of salinity of grounds offered results that are validated with field studies. The objective of the investigation was to determine the relation of the salinity of the ground, the topography and obtained indices of vegetation by means of teledetección in an area under irrigation of agroecosistema Mayarí. An image of grid 011/046 of the satellite Sentinel 2 of the Geologic Service of the United States was obtained, projected in 84 zone WGS UTM Zona 18 N in software QGIS 3,10 for the calculation of the spectral index of salinity and NDVI. In software ArcGIS 10,5 100 random points of the values of each area included/understood in each image were extracted, and software Statgraphics by means of regression analysis of the saline index and the NDVI were processed in. The thematic maps show the presence of saline zones with negative values of this index whereas the NDVI presented/displayed areas with little vegetation. The obtained model showed a linear dependency between the variables with values of coefficient of determination and negative correlation near 100 %. is stated the relation between the salinity of the ground with the NDVI, even though was made a study using technical of remote perception which can be used in investigations of this type, for the decision making in agroecosistema Mayarí.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
1. La salinidad del suelo .....	4
1.1. Caracterización de los métodos de estudios de la salinidad de los suelos en Cuba .....	7
2. Fundamentos de teledetección o sensoramiento remoto.....	8
2.1. Espectro electromagnético .....	9
2.2. Teoría de scattering en la atmosférica.....	11
2.3. Influencia de la atmósfera en la teledetección .....	11
2.4. Principales componentes de la radiación electromagnética con influencia de la atmósfera.....	13
2.5. Respuesta espectral del suelo .....	13
2.6. Detección de la salinidad del suelo usando imágenes de satélite .....	16
2.7. Índices Espectrales de Vegetación .....	18
2.8. Preprocesamiento de imágenes multiespectrales de satélite.....	22
MATERIALES Y MÉTODOS .....	24
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	27
CONCLUSIONES .....	34
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

## INTRODUCCIÓN

La salinización de los suelos es uno de los peligros ambientales que degrada las tierras de cultivo y su rehabilitación es muy costosa. Constituye uno de los principales problemas globales que afecta las bases económicas y sociales de muchos países en el mundo (Sigueñas *et al.*, 2019).

Este problema de degradación del suelo está presente en alrededor del 10% del área arable total a nivel mundial, es decir un total estimado de mil millones de hectáreas y un aproximado entre 25% y 30% de terrenos irrigados están afectados por procesos de salinización, volviéndose improductivos comercialmente (Shahid *et al.*, 2018).

Desde el punto de vista agrícola, los suelos salinos son los que contienen suficientes sales solubles en la zona de raíz que afecta negativamente el crecimiento de las plantas, al hacer el agua del subsuelo menos disponible para su extracción por las raíces, debido a la reducción del potencial osmótico del agua del suelo (Allen *et al.*, 2006).

Se conoce que el problema del mapeo de suelos afectados por sal es una cuestión difícil ya que es un proceso dinámico. La salinización del suelo es un proceso en el que las sales disueltas se agrupan en la superficie del suelo y en las capas superiores del suelo. Sin embargo, el uso del mapeo de análisis hiperespectral y el monitoreo de tierras degradadas, especialmente en suelos afectados por sal, han mostrado una gran promesa de mayor velocidad, precisión y rentabilidad (Paz *et al.*, 2018).

Las imágenes multiespectrales, proporcionan una amplia información espectral para identificar y distinguir materiales espectralmente únicos. El análisis de imagen se ha convertido en las tecnologías más potentes y de ágil crecimiento en el campo de teledetección. Es una técnica avanzada para obtener un gran número de bandas de longitud de onda, medidas en un solo píxel (Nila *et al.*, 2012).

D'Almeida *et al.* (2005) indican que el análisis de datos de salinidad deben ser realizados de modo que permita la identificación de factores que están contribuyendo en el aumento de las sales y de esta forma identificar las áreas

afectadas, para implementar un monitoreo de las variaciones temporales, con el objetivo de planear el estudio de recuperación, definición de estrategias de manejo e identificación de los factores responsables del problema. Al respecto Queiroz *et al.* (1997) refieren que la utilización de la estadística clásica y de la geoestadística complementa el análisis e interpretación de datos de salinidad obtenidos en una determinada región.

Regazzi y Leite (1992) y Maia *et al.* (2001) de igual forma exponen que la regresión lineal es una técnica usada ampliamente en la investigación agrícola, en especial en el área de suelos y aguas, sin embargo, debe emplearse solo en determinadas circunstancias para que el modelo estadístico usado represente de forma fiel el estudio analizado, debido a, que solo conociendo la verdadera relación entre variables independientes y dependiente se pueden hacer inferencias estadísticas precisas con utilidades prácticas para controlar y predecir las respuestas en el estudio de caso.

Para poder desarrollar un manejo sostenible de suelos afectados por procesos de salinidad y controlar la expansión de este nocivo proceso, la FAO en conjunto con GSP (Global Soil Partnership) usan imágenes satelitales multiespectrales de los satélites Landsat, Sentinel y MODIS, mediante el uso de software de sistemas de información geográfica se realizan las respectivas correcciones de las imágenes y depuramiento de información, resultando en mapas de salinidad a nivel regional (FAO, 2020).

El uso de teledetección y sensores remotos para determinar el nivel de salinidad en el suelo ha sido exitoso en diferentes regiones a nivel mundial. Asfaw *et al.* (2018) mencionan que usando un manejo integrado de teledetección y métodos estadísticos se puede determinar los niveles de conductividad eléctrica y desarrollar modelos predictivos de salinidad de suelos.

En el agroecosistema Mayarí de la provincia Holguín se implementan diferentes tecnologías de riego sobre suelos ya degradados por el efecto antrópico y se desconoce la magnitud de la salinidad en diversas áreas. No se cuenta en los polos productivos con mapas que permitan tomar acciones dirigidas a mitigar

problemas de salinidad de los suelos dado que los estudios de este tipo son muy costosos en tiempo y dinero.

Por lo antes expuesto se plantea como **problema científico** el siguiente:

¿Cómo determinar la relación que existe entre la salinidad del suelo y el estado de la vegetación determinada por teledetección en la máquina No 1. del polo productivo “La Julia” en el agroecosistema Mayarí?

Ante esta pregunta científica se formula como **hipótesis** la siguiente:

Mediante el uso de la teledetección se puede determinar la relación que existe entre la salinidad del suelo y el estado de la vegetación en la máquina No 1. del polo productivo “La Julia” en el agroecosistema Mayarí.

Para dar cumplimiento a la pregunta científica, se define como **objetivo general**:

Determinar la relación que existe entre la salinidad del suelo y el estado de la vegetación determinada por teledetección en la máquina No 1. del polo productivo “La Julia” en el agroecosistema Mayarí

**Objetivos específicos:**

- Caracterizar el estado de la salinidad y de la vegetación mediante teledetección en el área de estudio.
- Determinar la relación entre la salinidad del suelo y el estado de la vegetación existente en el área de estudio.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1. La salinidad del suelo

Una de las consecuencias más nocivas del inadecuado uso del recurso suelo es su degradación. En la medida en que la demanda de productos principalmente agropecuarios ha aumentado, así mismo ha sucedido con la explotación de los suelos, el riego inadecuado, el exceso de fertilizantes, la tala masiva e indiscriminada entre otras acciones no convenientes a la mejora o al menos a la conservación del suelo (Azabdaftari *et al.*, 2016).

Uno de los procesos de degradación química es la salinización, la cual interviene en el cambio de las propiedades físicas de los suelos y es una variable dinámica espaciotemporal que se encuentra a diferentes escalas donde las sales están heterogéneamente distribuidas en el suelo (Babiker *et al.*, 2018).

Chen *et al.* (2020) afirman que los suelos salinos tienen gran variabilidad espacial y temporal natural, en virtud de las influencias de las prácticas de manejo utilizadas. Uno de los mayores detonantes antrópicos del proceso de salinización en los suelos es la irrigación, donde la calidad del agua utilizada y la falta de drenaje tienen alta injerencia en la salinización, debido a incorrectas prácticas agrícolas, lo que trasciende en suelos cada vez más salinizados y difíciles de recuperar.

La salinización es un problema que limita las actividades agrícolas, reduciendo la capacidad productiva de los suelos y su rendimiento, además modifica el patrón natural de integración espacial y temporal de las comunidades bióticas en los ecosistemas abiertos así lo establecen (Elhag, 2016).

Las zonas más susceptibles a salinización se caracterizan por presentar evaporación superficial y absorción de agua por las plantas que puedan exceder el nivel de las precipitaciones, lo que da paso a el ascenso de las aguas de acuíferos a la superficie terrestre, las cuales cargadas con sales disueltas pueden degradar la estructura química y física del suelo, lo que repercute en condiciones desfavorables para el crecimiento de la vegetación y su estabilidad (Earth Observing System, 2020).

En estas condiciones edafológicas, la acumulación de sales en los suelos es causada por procesos naturales o antropogénicos que, según Asafw *et al.*, (2018) son denominados primarios o secundarios respectivamente. Además indican que la salinización es un proceso complejo, que implica el movimiento de sales y el agua en los suelos durante los ciclos estacionales y las interacciones con las aguas subterráneas.

En el desarrollo de la investigación sobre suelos con proceso de salinización es fundamental la caracterización del proceso, describiendo el tipo de sal, su cantidad y la medición de sus indicadores: conductividad eléctrica (CE), saturación de bases (SB), contenido de sal intercambiable (Na, K, Ca, M) (Bloodnick y Peery, 2018).

La CE, indica la velocidad con la que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, siendo esta proporcional a la concentración de sales en la solución, es decir, a mayor CE mayor concentración de sales y se mide en milimhos por centímetro cúbico ( $\text{mmhos cm}^{-3}$ ) también conocida como decisiemen (Bloodnick y Peery, 2018).

La salinidad de los suelos puede originarse de un material parental salino, por la inundación de aguas marinas, por sales llevadas por el viento o por la irrigación con agua salada. Sin embargo, la mayoría de los suelos salinos se originan por ascensión capilar y evaporación de agua que acumula sal con el pasar del tiempo (Bloodnick y Peery, 2018).

La salinidad también puede ser consecuencia de la actividad humana. Debido a un manejo inadecuado del riego por parte del hombre, movilización de tierras, excesivo uso de fertilizantes, la actividad industrial en cuencas hidrográficas y otras (Bloodnick y Peery, 2018).

Los procesos de salinización suceden cuando los ciclos naturales pueden ser modificados por las **actuaciones del hombre, se trata de los ciclos antropogénicos, los principales son (Bloodnick y Peery, 2018):**

- Actividades agrícolas mal realizadas.
- Uso inadecuado de fertilizantes.

- Riego con aguas residuales con alto contenido de sales.
- Desconocimiento de los procesos de salinización y de los factores que la controlan.

Actividades Industriales y mineras: la industrialización ha aumentado los contenidos de NO<sub>x</sub> (nitrito y nitratos) y compuestos a base de azufre, que son devueltos al suelo por lluvias acidas que aumentan la tasa de mineralización. La minería por dejar en o cerca de la superficie material salino (Porta *et al.*, 2003).

Lo anterior mencionado ha generado un desequilibrio en sistemas que han recibido agua: como mojar materiales con una alta capacidad potencial para actuar como centros de distribución de sales, elevar el nivel de la capa freática, provocar una acumulamiento de sales en la zona radicular por riegos continuados sin un buen sistema de drenaje, procesos de sodificación con degradación de la estructura, por regar con aguas con bajas concentraciones de Ca<sup>2+</sup>.

Efecto de la salinidad del suelo a la planta (Awad, 1966):

- Como resultado de la inhibición osmótica de adsorción del agua.
- Como resultado de la acumulación de solutos necesaria para mantener la turgencia de la planta; la planta será más tolerante a la salinidad en la medida que esa acumulación no disminuya el crecimiento.

El efecto de un alto contenido de sal en el suelo da origen a plantas enanas, achaparradas. Esto a menudo no se aprecia en el campo si no hay otros lugares de suelo pobre en sales que actúen de testigo, y los rendimientos pueden reducirse en más de un 20% sin que el agricultor advierta del daño por la salinidad.

Los efectos del daño por sales se han resumido como sigue (Wild, 1989):

- Sequía fisiológica: que es un efecto osmótico directo.
- Mayor resistencia hidráulica de raíces y hojas.
- Alteración del contenido de hormonas, influyendo así en los ritmos de crecimiento.
- Daño directo, particularmente a los mecanismos fotosintéticos.

- Efecto de la topografía en el contenido de sales en el suelo.

La estructura y la permeabilidad del suelo pueden ser dañadas por el alto contenido de sodio intercambiable que queda en el suelo cuando las sales son lavadas, salvo que se tomen medidas preventivas o correctivas, tales como la aplicación de yeso (FAO, 2000).

La estructura del suelo puede degradarse al utilizar agua de riego de baja concentración de electrolitos y por una elevada concentración de sodio en el complejo de cambio. En general, la concentración total y el tipo de sales por un lado y la mineralogía de las arcillas por otro determinan la naturaleza de las interacciones entre el agua y la matriz del suelo.

La acción dispersante del sodio sobre las arcillas y la de defloculación de la materia orgánica afecta a las propiedades físicas del suelo, los agregados son poco estables, y el medio será menos apto para el crecimiento de las raíces de las plantas. En el manejo de suelos con riesgo de sodificación habrá que tener en cuenta el valor de la concentración de sodio intercambiable, para no producir una degradación de las propiedades físicas del suelo (Porta *et al*, 2003).

Cuando en un suelo se dan condiciones de, alto contenido de sodio intercambiable, baja proporción de materia orgánica, encharcamiento debido a lluvia o riego, pueden formar costras superficiales, que representan un grave impedimento para la emergencia de plántulas recién nacidas y en ciertos cultivos es la causa principal que se tenga una pobre densidad de plantas. En este sentido son los suelos sódicos los que presentan problemas, aunque no es exclusivo de estos. De aquí se deduce que, si se quiere impedir la formación de costras, hay que eliminar el sodio intercambiable, agregar materia orgánica y evitar que este húmedo durante la labranza (Richards, 1985).

### **1.1. Caracterización de los métodos de estudios de la salinidad de los suelos en Cuba**

La salinidad del suelo se evalúa por medio de la conductividad eléctrica (CE) de la disolución del suelo a un contenido dado de agua dado, normalmente el

correspondiente a saturación (conductividad eléctrica en el extracto, CE e). Por definición, un suelo se considera salino si  $CE > 4 \text{ dS.m}^{-1}$  (Parra *et al.*, 2002).

La estimación de la salinidad del suelo por los métodos que tradicionalmente se hacen involucran tres tareas: la toma de las muestras, que incluyen la apertura de una calicata para hacer una descripción general del perfil hasta un metro de profundidad para conocer algunos signos que indiquen cercanías o no del manto freático, o manto freático colgado, o procesos de oxidación reducción que reflejen la posibilidad de salinidad secundaria u otra señal relacionada con la salinidad, su procesamiento en el laboratorio, donde se realizará el análisis de las mismas según la norma cubana correspondiente (NC 32:1999) y la confección del cartograma y del informe valorativo.

No obstante, se han introducido mejoras en la metodología para disminuir el número de muestras necesarias, utilizando técnicas de Geoestadística (Utset *et al.* 1998) para evaluar la correlación espacial de la salinidad. De igual modo, se han introducido técnicas de interpolación espacial y de visualización gráfica que mejoran considerablemente la representación de los resultados de estos trabajos de determinación de la salinidad.

## **2. Fundamentos de teledetección o sensoramiento remoto**

Los sensores remotos obtienen información de un objeto a distintas escalas dependiendo del tipo de sensor utilizado, en tiempo real y sin entrar en contacto físico con el objeto más que la medición de su energía en longitud de onda (Jensen 2007).

A su vez la información brindada por los sensores remotos puede ser obtenida desde plataformas espaciales (satélites) y aéreas (aviones y UAVs), estas “plataformas de observación portan instrumentos que son susceptibles a recibir y medir la intensidad de la radiación que procede del suelo en cierta gama de longitudes de onda y transformarla en una señal que permita localizar, registrar y digitalizar la información en forma de fotografías o imágenes numéricas grabadas en cinta magnética compatibles con un ordenador.

Los captosres pueden ser cámaras fotográficas, radiómetros de barrido multiespectral, radares y láseres. Estos aparatos generan imágenes analizando la radiación emitida o reflejada por las formas y objetos de la superficie terrestre en las longitudes de onda en las cuales son sensibles (ultravioleta, visible, infrarrojo próximo, infrarrojo técnico e hiperfrecuencias) con el fin de reconocer la variada gama de formas y objetos” (Sacristán, 2005).

La combinación de información soportada por sensores remotos integrada con datos alusivos a la caracterización de suelo, calidad de la vegetación, relieve, clima, etc., junto con la información analógica y/o digital de cartografía más fotografías aéreas de la zona de interés son los mejores insumos como fuente de datos para los SIG, que pueden generar homogenización de zonas y actualización de datos para lograr conclusiones significativas en el apoyo a la identificación de suelos con salinización (García *et al.*, 2013). Según Begni *et al.* (2005), los sensores se caracterizan por presentar:

Resolución espacial: corresponde al tamaño del elemento más pequeño que se puede detectar en la superficie de la tierra y está determinado por el tamaño del pixel, las funciones de la resolución espacial es distinguir en una imagen la nitidez y los detalles.

Resolución espectral: es el ancho o el rango de longitud de onda de la parte del espectro electromagnético que el sensor puede registrar y el número de bandas que utiliza el sensor, entre más estrechas sean las bandas mejor será la resolución espectral.

Resolución temporal: es la frecuencia con la que un sensor obtiene una imagen de un lugar en particular.

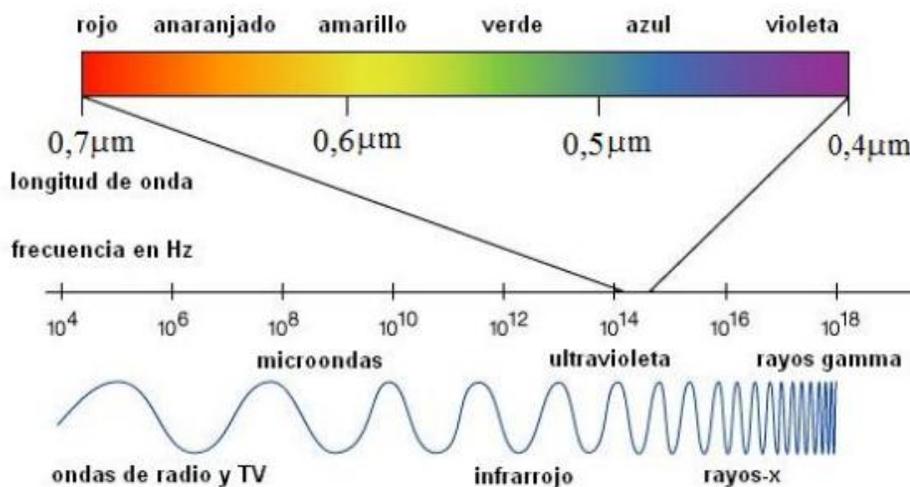
## **2.1. Espectro electromagnético**

El espectro electromagnético se extiende desde los rayos cósmicos con longitudes de onda hasta las radiofrecuencias bajas y longitudes de onda larga, aunque algunos sensores han realizado trabajos para longitudes de onda más cortas. Las longitudes de onda que generalmente son más usadas están alrededor de 300 y 400 nanómetros. La región más empleada es la región del visible e infrarrojo

cercano entre 400 nm y 1. Las regiones de transmisión atmosférica y/o regiones infrarrojas son usadas por sistemas radiométricos que trabajan desde 3 hasta 15 (infrarrojo termal).

Las microondas y los sensores de radar operan en longitudes de onda de rango de 1mm a 1m. El espectro visible es aquel con el que estamos más familiarizados; puede ser observado cuando la luz blanca es dispersada por gotas de agua en un arco iris. Todos los tipos de cobertura terrestre (tipos de roca, cuerpos de agua, tipos de vegetación, cascos urbanos, etc.), absorben una parte de la radiación electromagnética, dándole una firma distinguible de otra a lo largo del espectro.

Se puede analizar los datos de las imágenes provenientes de sensores remotos y crear hipótesis bastante precisas acerca de una cobertura gracias a su firma espectral (Slater, 1980).



**Figura 2. Espectro electromagnético (Slater, 1980).**

La Figura 2 muestra las principales regiones del espectro electromagnético empleadas en teledetección. Las regiones correspondientes al infrarrojo cercano y medio son muchas veces referidas como la región del infrarrojo de onda corta (SWIR por sus siglas en inglés). Esta se distingue de la región termal o de la región del infrarrojo lejano, que también es conocida como la región del infrarrojo de onda larga (LWIR por sus siglas en inglés). Estas dos regiones se distinguen

en que el SWIR se caracteriza por radiación reflejada mientras que el LWIR se caracteriza por emisión de radiación.

## **2.2. Teoría de scattering en la atmosférica**

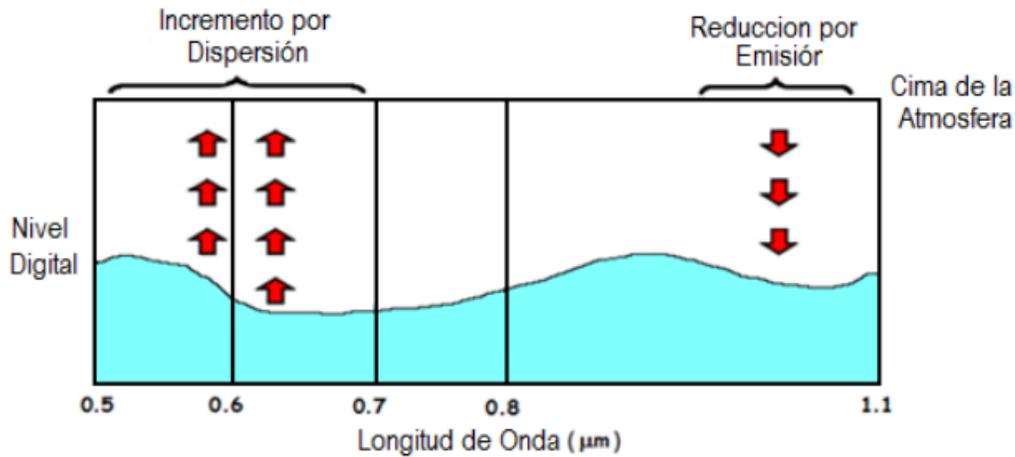
La radiación solar que llega a la superficie terrestre está atenuada en su intensidad por diversos procesos que se producen a lo largo de su recorrido a través de la atmósfera terrestre. Estos procesos son: Absorción selectiva por los gases y por el vapor de agua de la atmósfera. Scattering de Rayleigh, debida también a los gases y al vapor de agua. Difusión y absorción de aerosoles o turbidez (Scattering de Mie).

El estudio de la dispersión de la luz por efectos atmosféricos se hizo en un principio para explicar el azul del cielo y fue Lord Rayleigh el que hizo una contribución más importante en este campo, quien sostuvo que las moléculas de aire dispersaban la luz. Los cálculos de Rayleigh están basados principalmente para partículas dispersoras pequeñas y homogéneas cuyas propiedades eléctricas son distintas a las del medio y se comportan prácticamente como dipolos (Lira *et al.*, 1983).

Datos experimentales muestran que el scattering de Rayleigh predomina en atmósferas limpias y secas, mientras que la presencia de partículas de polvo y gotas genera otro tipo de scattering, la cual fue estudiada por G. Mie (Lira *et al.*, 1983). El proceso de scattering depende de la distribución del tamaño de elementos esparcidos, su composición, concentración, y la longitud de onda o distribución en longitudes de onda del flujo radiante sobre ellas (Slater, 1980).

## **2.3. Influencia de la atmósfera en la teledetección**

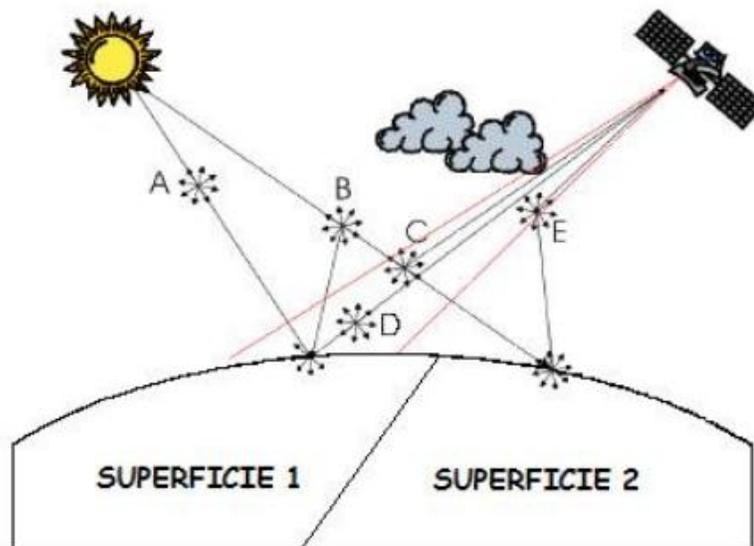
Como se comentó anteriormente, la radiación electromagnética se ve notablemente afectada por distintos componentes presentes en la atmósfera, como estos componentes dispersan o absorben en diferentes longitudes de onda (Figura 3) hacen difícil la observación remota de la superficie terrestre. Es conveniente considerar que la radiancia detectada por los sensores está en función de los ángulos polar, azimutal y de elevación solar, para un intervalo en longitud de onda.



**Figura 3. Efecto de la dispersión y absorción atmosférica (Jensen, 2004).**

La medida que hace el sensor involucra una radiación propia de la superficie terrestre, la emitancia espectral de la cubierta y una contribución por la absorción o dispersión de flujo radiante desde el Sol.

Como se muestra en la Figura 4, el flujo de radiación electromagnética sufre una serie de procesos los cuales son: (A) Pérdida o escalaje de la cantidad e intensidad del flujo incidente. (B) Dispersión del flujo incidente en dirección de la superficie. (C) Dispersión del flujo incidente en dirección del campo de visión. (D) Dispersión del flujo reflejado en dirección del campo de visión. (E) Radiación emitida por otras cubiertas en dirección del campo de visión.



#### Figura 4. Papel de la atmósfera en teledetección (Slater, 1980).

### 2.4. Principales componentes de la radiación electromagnética con influencia de la atmósfera

Para el estudio de la corrección atmosférica, se acostumbra evaluar dos componentes relativas a la posición geográfica de la zona monitoreada. Los cuales están en función de la ubicación del sensor y del Sol con respecto a un punto P en el terreno. Estos componentes que son, la corrección por iluminación y el ángulo cenit del satélite la observación, se muestran en la Figura 5.

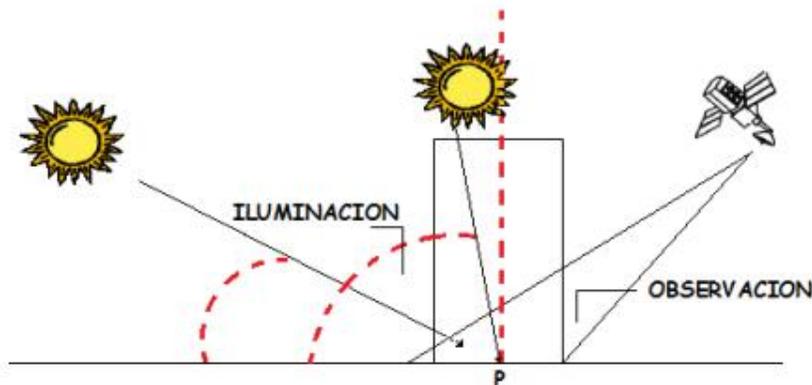


Figura 5. Componentes de la radiación.

### 2.5. Respuesta espectral del suelo

Las propiedades espectrales de los suelos difieren considerablemente de aquellas de la vegetación, dado que la mayoría de los sensores captan información sobre la capa superficial de la tierra. Sólo donde el suelo está expuesto es posible captar información directa sobre éste como, por ejemplo, áreas áridas, semiáridas, o bien, en zonas recién preparadas para la siembra o erosionadas.

Donde exista cualquier tipo de cobertura, será ésta la que condicione la reflexión de energía electromagnética. Los factores que condicionan la reflexión de energía en los suelos son el contenido de humedad, textura, estructura y composición del suelo (Hernández y Montaner, 2009).

Según Basterra (2011), la firma espectral del suelo, cuando este se encuentra sin cobertura vegetal, muestra un comportamiento ascendente en su curva espectral,

la cual va desde el espectro visible hasta el infrarrojo, estas variantes en el comportamiento del suelo se deben a la composición química, textura, estructura y el contenido de humedad presente en el mismo.

Los suelos con contenidos calizos tienden a tener una reflectividad alta en todas las bandas visibles, no siendo así en los suelos arcillosos, los cuales suelen tener una alta reflectividad en la banda roja del espectro, debido a la presencia de óxido hierro.

En general mayor reflectividad, cuanto más secos y menor contenido de materia orgánica posean. En las longitudes de onda largas, es determinante el contenido de humedad. La textura juega un papel importante en el comportamiento espectral de los suelos, debido a su influencia en la capacidad de retención de humedad como a la influencia que ejercen el propio tamaño de las partículas sobre la reflectividad (Tipantuña, 2017).

En términos generales, el tamaño de las partículas influye en la proporción de radiación reflejada por los suelos en relación inversa a su tamaño. A mayor diámetro de las partículas menor proporción de reflectancia. En el caso de suelos arcillosos, aun en el caso de poca humedad, su reflectividad está influida por la curva de absorción del agua. En cambio, para los suelos arenosos su reflectividad es independiente de la curva de absorción del agua, siempre que la humedad del suelo no sea alta. En condiciones de laboratorio, las curvas de reflectancia para diversas texturas presentan formas muy similares, tanto en la región visible como en el infrarrojo cercano y medio (Telesat, 1999).

La materia orgánica es una forma más directa que condiciona la reflexión en los suelos. Se ha demostrado que al destruir la materia orgánica en los suelos se produce un incremento en el nivel de radiación reflejada, situación que también se manifiesta en condiciones de campo.

Otro constituyente que influye directamente en las propiedades espectrales de los suelos es la presencia de óxidos de hierro, concentraciones notables de calcio, u otras sales que pueden acumularse en la superficie o afectar el desarrollo de la

cobertura vegetal. Estos componentes influyen en las propiedades espectrales de los suelos, en tanto afecten el color en la superficie.

Así las concentraciones de calcio, producen suelos blanquecinos cuya reflectancia es mayor que la de los suelos rojos derivados de óxidos de Fe; los suelos negros ricos en materia orgánica, presentan los menores porcentajes de reflectancia (Telesat, 1999).

La obtención de una visión global de toda o una parte de la superficie de la Tierra a diferentes escalas, disponibilidad de una amplia variedad de sensores, posibilidad de obtención de información, tanto actualizada como histórica de una zona determinada; muestra datos no visibles para el ser humano, repetidamente en el tiempo y en algunos casos, de forma inmediata; integración de las diversas fuentes de datos (existentes, tomados en campo, por GPS, etc.) mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), a un costo relativamente bajo (Ruiz, 2008).

La información provista por sensores remotos es importante para estudios relacionados con el uso, la ocupación y la producción de la superficie del suelo. También permite la obtención de información de campo a un menor costo respecto a otros métodos, la cobertura de grandes áreas y la posibilidad de repetir la obtención de los datos en forma periódica a lo largo del tiempo (Bocco *et al.*, 2013).

Los productos de la teledetección han permitido, en la actualidad, anticipar y estimar el rendimiento de un cultivo agrícola con mayor precisión (Wang *et al.*, 2013). La teledetección desde plataformas remotas se ha utilizado para predecir el rendimiento del arroz y podría también utilizarse como una herramienta de ayuda a la decisión en el ajuste de la fertilización nitrogenada en cobertera.

Existen varios tipos de imágenes que se pueden utilizar para monitorear la superficie terrestre. En áreas agrícolas donde los lotes son pequeños, debido a su resolución espacial, los datos de LANDSAT TM y SPOT son muy adecuados; no obstante, la frecuencia temporal de estos satélites y la posibilidad de nubosidad durante sus pasadas son, a veces, una limitante (Bocco *et al.*, 2009).

## 2.6. Detección de la salinidad del suelo usando imágenes de satélite

Una nueva técnica que se ha venido evaluando en los últimos años, por investigadores de países desarrollados, para la estimación de la salinidad es la teledetección. Entre las ventajas del empleo de la teledetección para el cartografiado y monitoreo de la salinidad se pueden mencionar las siguientes: Las imágenes son procesables en Sistemas de Información Geográfica (SIG) con lo que se aprovechan las posibilidades de representación, análisis y salida de estos.

Permite un ahorro de tiempo y esfuerzo físico, lo cual posibilita la repetición temporal de los estudios y actualizar los datos anteriores (monitoreo). En tal sentido, se requiere el uso de modelos matemáticos robustos ante la presencia de factores ruidosos para la tarea y que sean susceptibles de ser modificados por criterios de experto (Peng, 1998), el empleo de sensores con mayor resolución espacial, espectral y radiométrica y el desarrollo de la modelación biofísica, que permita fundamentar la correlación de la salinidad con rasgos extraídos de la combinación de la respuesta espectral en diferentes longitudes de onda. En este último caso, se destacan los trabajos relacionados con el cálculo y correlación de índices de vegetación.

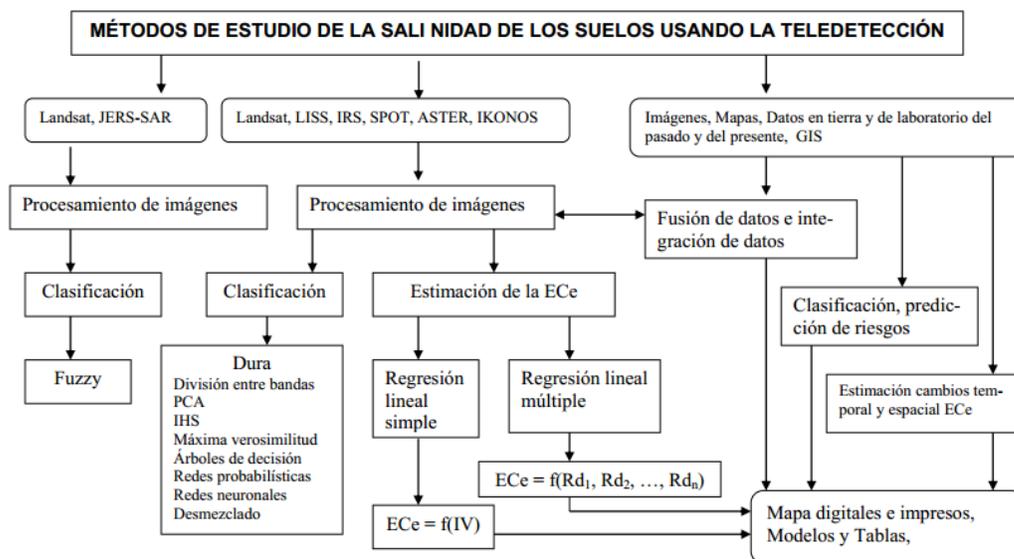


Figura 6. Métodos de estudio de la salinidad de los suelos usando la teledetección. Tomado de (Lau, 2005).

En la Figura 6 se muestra un esquema que resume tales métodos y productos usados por la teledetección para el estudio de la salinidad. Hemos podido constatar que existen un número relativamente grande de métodos y productos espaciales y que fueron desarrollados en un corto período de tiempo para la clasificación, monitoreo, levantamientos y estimación de la salinidad de los que usan la teledetección y entre sus cualidades, como señaló (Metternicht y Zinck, 2003), para brindar datos rápidos, temporales, relativamente baratos y repetitivos, la teledetección juega un rol importante permitiendo detectar, cartografiar y monitorear los rasgos de la superficie afectadas por la sal.

La validación en tierra se mantiene necesaria para determinar las relaciones entre la reflectancia y los tipos y grados de sal en el suelo y el agua subterránea, deducida de las características superficiales directamente en los suelos descubiertos o indirectamente en la vegetación.

Como resumió tempranamente Mougenot *et al.* (1993), la estimación directa y precisa de cantidades de sales de la teledetección de satélites es más difícil a causa de: Falta de bandas de absorción específicas de algunos tipos de sales (o sea, halitas) y ocurrencia de confusiones espectrales.

Baja resolución espectral de las bandas del satélite. Variabilidad vertical, espacial y temporal de la salinidad en el manto y substrato del suelo. La salinización representa un incremento de riesgos medioambientales, especialmente en áreas regadas. Esto reclama por el monitoreo para ayudar a tiempo a los tomadores de decisión en el manejo, recuperación y rehabilitación de la tierra. El monitoreo de la salinidad es grandemente realizado cuando se usan datos de teledetección, los cuales sin embargo necesitan transformación antes que sean usados para la identificación y detección del cambio.

Es el reto del investigador identificar los indicadores más adecuados de la salinidad para un área particular, tal que técnicas apropiadas en tierra y de teledetección puedan ser aplicadas para extraer la información de una manera exacta y costo-efectiva. Una de esas técnicas es la de redes neuronales, las cuales permiten ajustar la relación entre las variables independientes y

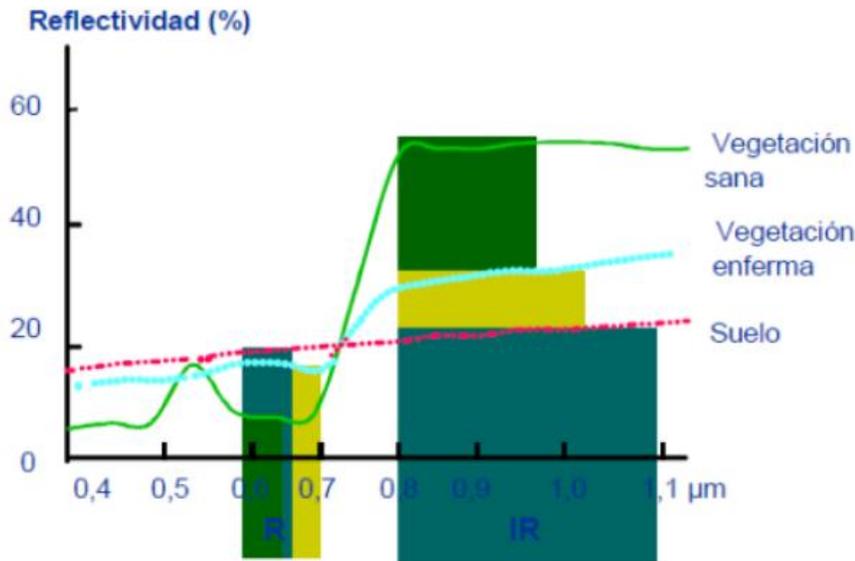
dependientes sin ceñirse a una función matemática específica y por tanto incrementar su exactitud.

Esto sólo requiere a cambio la reiteración del proceso de aprendizaje hasta lograr el ajuste ó precisión requerido, de aquí que se escogió para desarrollar esta tesis en combinación con los métodos de integración de datos vigentes y el uso de imágenes multiespectrales de alta resolución, que hasta el presente sólo se había usado como clasificación de los suelos afectados por la salinidad.

## **2.7. Índices Espectrales de Vegetación**

Es un cociente o ratio implica efectuar una división, pixel a pixel, entre los ND almacenados en dos o más bandas de la misma imagen. Los índices espectrales se utilizan ampliamente en dos situaciones: 1) para mejorar la discriminación entre coberturas con comportamiento reflectivo muy distinto en esas bandas, por ejemplo para realzar suelos y vegetación en el VIS e IRC, y 2) para reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas coberturas, sin embargo resulta más recomendable aplicar correcciones del sombreados topográfico, centrando el interés de estos índices en mejorar la discriminación de las coberturas vegetales y estimar algunas de sus variables biofísicas.

El empleo de cocientes para discriminar masas vegetales se deriva del peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación (Figura 7). La vegetación sana muestra un claro contraste entre las bandas del VIS y especialmente la banda roja (0,6-0,7 $\mu$ m) y el IRC (0,7-1,1 $\mu$ m). Mientras en el VIS los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, estas sustancias apenas afectan al IRC. Por esta razón, se produce un notable contraste espectral entre la banda reflectividad de la banda R del espectro y la del IRC, lo que permite separar, con relativa claridad, la vegetación sana de otras de otras coberturas (Chuvienco, 2010).



**Figura 7. Comportamiento de la vegetación en el espectro electromagnético.**

Cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés (por ejemplo, por plagas o sequías intensas), su reflectividad será inferior en el IRC, aumentando paralelamente en el rojo (al tener menor absorción clorofílica) con lo que el contraste entre ambas será mucho menor. Cuanto mayor sea la diferencia entre reflectividades de la banda IRC y R, mayor vigor vegetal presentará la cobertura observada (Chuvienco, 2010).

Bajos contrastes indican una vegetación enferma, senescente o con poca densidad, hasta llegar a los suelos descubiertos o al agua, que representan una reflectividad muy similar entre el IRC y el R, o incluso inferior en esta última (caso del agua o las nubes).

La caracterización espectral de las masas vegetales tienen notables dificultades debido a los factores que influyen en la radiancia que detecta el sensor (Chuvienco, 2010). Los factores se pueden dividir en 3 grandes grupos:

- I. Los relacionados con la reflectividad de la hoja: presencia de pigmentos, la estructura celular y el contenido de humedad son los más destacados.
- II. Las características geométricas de la planta, principalmente su área foliar, la forma de sus hojas, su distribución en la planta, la geometría del dosel, la importancia del componente leñosos, etc.

- III. Los aspectos derivados de la situación geográfica de la planta: pendiente, orientación, asociación con otras especies, reflectividad del sustrato, geometría de plantación, condiciones atmosféricas, etc.

La baja reflectividad en la porción visible del espectro se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja, principalmente las clorofilas, xantofilas y carotenos. Todos ellos absorben en la banda del espectro situado en entorno a los  $0.445\mu\text{m}$ , mientras la clorofila representa una segunda banda de absorción en torno a los  $0.645\mu\text{m}$ , en donde el efecto absorbente es menor. Por esta causa el aparece un pico relativo de reflectividad que coincide con la banda verde del espectro visible, y causa el color con el que nuestros ojos perciben la vegetación vigorosa (Chuvienco, 2010).

Cuando se aproxima la caída otoñal de las hojas, la clorofila ejerce una menor influencia, lo que explica su mayor reflectividad en la banda roja y, en definitiva, su color amarillento (verde + amarillo).

La elevada reflectividad en el infrarrojo cercano se debe, por un lado, a la baja absorción de las clorofilas, y, por otro, a la estructura celular interna de las hojas (Figura 3). La hoja se compone, en esencia de cuatro capas: la epidermis superior e inferior, el parénquima en empalizada y el mesófilo esponjoso. Las dos primeras juegan un importante papel en la regulación térmica de la planta y su absorción de  $\text{CO}_2$ .

El parénquima alberga los cloroplastos, mientras en el mesófilo tienen lugar los intercambios gaseosos necesarios para la respiración de la planta. Debido a ello cuentan con unas cavidades de aire internas, que dispersan la mayor parte de la radiación incidente en el NIR (Hofer *et al.*, 2011).

Por ello la hoja sana ofrece una alta reflectividad en esta banda, en claro contraste con la baja reflectividad que presenta en el espectro visible, especialmente en la banda roja; puesto que la estructura de la hoja es muy variada según las especies, esta banda también resulta idónea para discriminar entre plantas, incluso entre aquellas que o podrían separarse en el espectro visible. Cualquier fuente de estrés

en la vegetación mostrará en un comportamiento espectral diferente a los parámetros generales.

La hoja senescente o enferma tiende a perder actividad clorofílica y, en consecuencia, a ofrecer una menor Absortividad en las bandas azul y roja del espectro visible. El aumento consecuente de la reflectividad en estas bandas elimina el máximo relativo antes situado en el verde, por lo que la hoja tiende a mostrar un color amarillento. Por el contrario, en el NIR se produce una reducción de la reflectividad, como consecuencia del deterioro de la estructura celular de hoja, por lo tanto la curva espectral se hace más plana, menos cromática (Chuvieco, 2010).

A partir de 1,4  $\mu\text{m}$  el efecto absorbente del agua es muy claro, por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en el SWIR. En el NIR y SWIR donde la absorción del agua es más clara, se sitúan dos picos relativos de reflectividad, en torno a 1,6  $\mu\text{m}$  y 2,2  $\mu\text{m}$ . Esta clara relación entre bandas, permite determinar aquellas zonas afectadas por el estrés hídrico (Chuvieco, 2010).

Otros factores que afectan la caracterización espectral de la vegetación son: la geometría de la planta, los ángulos de observación e iluminación, y las características del sustrato. El factor más destacado es la proporción hoja-suelo, siendo la reflectividad de la planta similar a la de la hoja cuando la cobertura es elevada y el ángulo de observación tiende a ser cenital.

El índice de área foliar (LAI), se utiliza frecuentemente ya que hace referencia a la productividad neta de la planta. El LAI se relaciona con el grado de cobertura verde del suelo (PV), hasta un cierto nivel de saturación (100% PV). Ese valor crítico se alcanza cuando el LAI se sitúa entre 3 y 6, según los ecosistemas. A partir de ahí se puede seguir aumentando el LAI, aunque el PV ya se mantenga estable, como consecuencia del apilamiento vertical de las hojas (Chuvieco, 2010).

Como principio genérico se afirma que, cuanto mayor sea el contraste entre las bandas del R y NIR, mayor será la cobertura vegetal y/o el vigor de la vegetación,

y más clara será su discriminación frente a otro tipo de coberturas (Chuvieco, 2010).

## 2.8. Preprocesamiento de imágenes multiespectrales de satélite

Para usar la información de las imágenes multiespectrales, es necesario hacer dos tipos de correcciones, una corrección geomática para cambiar el sistema de coordenadas y la proyección cartográfica, y una corrección radiométrica para cambiar los valores de niveles digitales de la imagen, limpiar cualquier defecto. Además, se debe realizar las calibraciones geométricas y radiométricas. La calibración geométrica limpia las distorsiones espaciales de la imagen y la calibración radiométrica transforma los niveles digitales de la imagen a valor físicos de radiancia y reflectancia (Pérez y Muñoz, 2006).

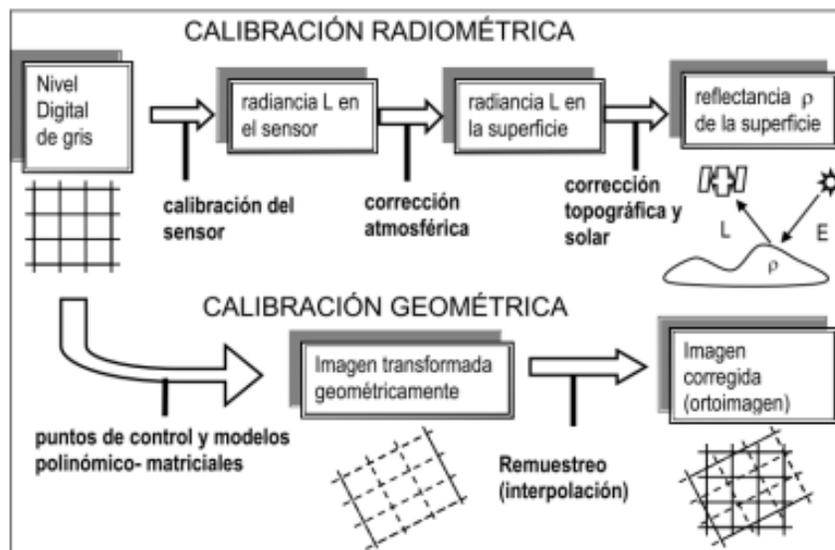


Figura 8. Esquema a utilizar para preprocesamiento de imágenes multiespectrales de satelitales según (Pérez y Muñoz, 2006).

### - Corrección geométrica

La corrección geométrica es un método esencial para el preprocesamiento de las imágenes satelitales cuyo objetivo es eliminar la distorsión geométrica. Este tipo de corrección sirve principalmente para posicionar la imagen en la zona territorial correcta y borrar las distorsiones en la imagen. Entre las

técnicas usadas para la corrección geométrica se detalla: El manejo de efemérides, DEM, identificación de puntos de control y remuestreos de los píxeles, entre otros.

#### - **Corrección radiométrica**

La reflectancia dada por un objeto medido por un instrumento de teledetección varía de acuerdo a diversas condiciones, como la iluminación del objeto, su reflectividad, transmisividad de la atmósfera, entre otros. También los resultados dados por un sensor pueden variar con el tiempo debido a su degradación, por lo que las condiciones radiométricas de los objetos son muy variables.

Por lo cual, se han desarrollado diversas técnicas de corrección radiométrica, como correcciones de la distancia tierra-sol, corrección de la elevación del sol y compensación de niebla (DiBiase *et al.*, 2009).

#### - **Corrección atmosférica**

Durante el proceso de movimiento de luz desde el sol hasta la superficie del planeta, el flujo radiante es absorbido y esparcido por los aerosoles presentes en la atmósfera, lo cual termina siendo un factor importante que modifica las condiciones de radiancia que son detectadas por los sensores.

En la imagen detectada, estos cambios en la radiancia y el esparcimiento se vuelven más notorios. Los aerosoles atmosféricos de menor tamaño son los principales causantes de este esparcimiento debido a que estos redireccionan la energía de onda corta añadida a la radiancia de la imagen y de los píxeles. Estos suelen causar lo que se conoce como efecto niebla, lo cual reduce la calidad de la imagen, en detalles especialmente, debido a la pérdida de contraste (Araya, 2007).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el año 2022 en el polo productivo “La Julia”, en un área de 17,34 ha bajo riego por pivote central pertenecientes a la Empresa Agropecuaria Guatemala, del agroecosistema Mayarí.

En la fecha en la que se realizó el estudio la mitad del cuadrante de la máquina de riego número 1 se encontraba sembrada de guayaba en fase de cosecha y maíz con 34 días de sembrado (Figura 9).



**Figura 9. Área perteneciente a la máquina de riego número 1 del polo productivo “La Julia”.**

Esta zona presenta una red fluvial desarrollada, con un alto por ciento del potencial hidráulico de la provincia y abundante lluvia (ONEI, 2019). El clima en el área de estudio en el período en que se realizó la investigación se presentó una temperatura de 24,87 °C y de precipitación con 86,56 mm.

Los suelos que predominan en el agroecosistema son los del tipo Vertisol Crómico según (Hernández *et al.*, 2015), los cuales se caracterizan por formarse a partir de sedimentos arcillosos ricos en esmécticas, con un espesor considerable (igual o mayor de 60 cm) y están bajo el proceso de Vertisolización, que da lugar a un horizonte principal de diagnóstico Vértico. Las características que distinguen a

estos suelos son el espesor arcilloso, plasticidad, el color oscuro, la formación de bloques prismáticos mayores de 15 cm con caras de deslizamiento, además de la presencia de grietas y microrrelieve gilgai.

Para la obtención de la imagen satelital se procedió a la descarga de la misma desde el sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos ([www.usgs.gov](http://www.usgs.gov))

La imagen utilizada (S2A\_MSIL2A\_20220104T154551\_N0301\_R111\_T18QUH\_20220104T175204) pertenece al satélite Sentinel 2, en la cuadrícula 011/046 del proyectada en el sistema WGS 1984 UTM Zona 18 Norte.

Sentinel 2 es la primera misión óptica que monitorea la superficie de la tierra, identifica y cuantifica áreas de cambios y usos de la tierra, fue lanzada el 23 de junio de 2015 equipada de instrumentos multiespectrales (MSI) con 7.25 años de vida útil. La misión de los Sentinel 2 está compuesta por dos satélites idénticos sobre la misma órbita separados por 180 grados que 28 logran una cobertura de todas las superficies terrestres incluyendo grandes islas y aguas costeras cada cinco días (León, 2015; USGS, 2020).

El índice espectral de salinidad utilizado fue el planteado por Khan *et al.* (2005) donde involucra a las bandas Blue (B-azul) y Red (R-roja) del Sentinel 2 como se muestra en la siguiente expresión:

$$IS = \frac{B_{Blue}}{B_{Red}} \quad \text{Expresión 1}$$

Para el caso del análisis de la vegetación se utilizó el Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI) propuesto por (Rouse *et al.*, 1973), el cual involucra a las bandas Red e Infrarrojas (NIR) del satélite:

$$NDVI = \frac{NIR - B_{Red}}{NIR + B_{Red}} \quad \text{Expresión 2}$$

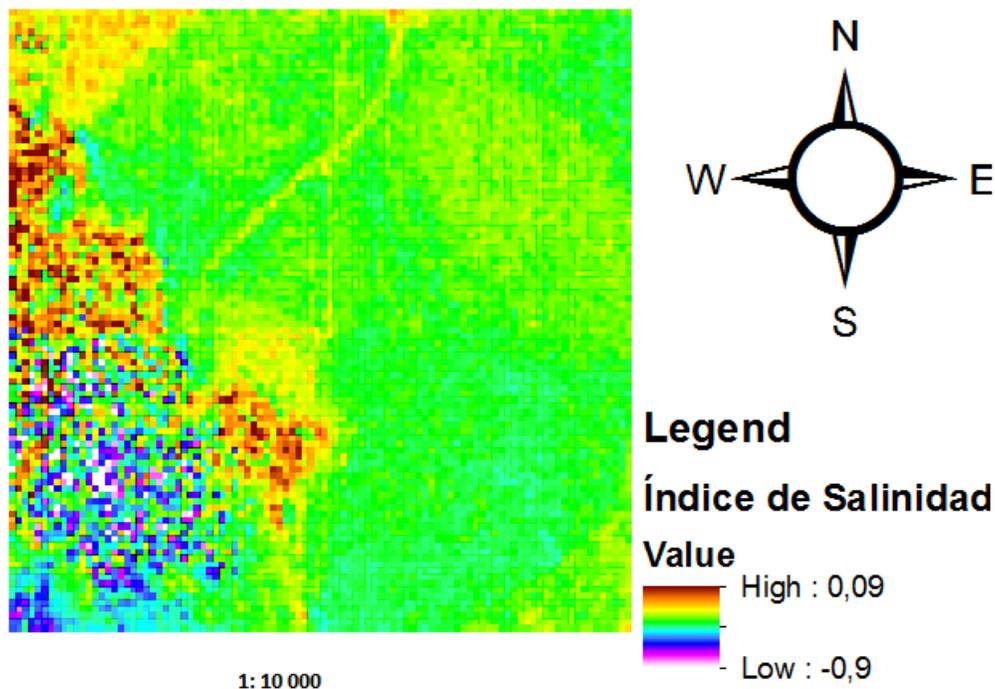
A la imagen utilizada se le realizó la corrección radiométrica para la eliminación de los efectos causados por la presencia de nubes en la zona de estudio, para ello se utilizó el software QGIS 3.10 "A Coruña" y realizada en él la confección de una

capa raster de 100 puntos aleatorios para la extracción de los valores de los índices espectrales utilizados en el estudio.

Luego de realizar el procesamiento de la imagen, cálculo de los índices espectrales de salinidad y vegetación; se extrajeron los valores de cada punto aleatorio en el software ArcGIS 10.5 y conformado una base de datos en Excel para el procesamiento de los datos en el software Statgraphics Centurion a partir del análisis descriptivo de los datos y de regresión lineal para comprobar la hipótesis planteada.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 10 muestra el mapa temático del índice de salinidad determinado mediante teledetección en la máquina número 1 del polo productivo “La Julia”. En ella se observa una alta variabilidad de los valores de este índice de salinidad que oscila desde -0,09 hasta 0,9; lo cual evidencia la presencia de una moderada salinidad en la zona de estudio a partir de los valores negativos de este índice, y que resaltan en el área donde por problemas de erosión hídrica se acumulan las mayores cantidades de sales en el suelo con colores en el mapa temático que se obtuvieron de 0,4 del índice utilizado con predominio del color blanco y azul.

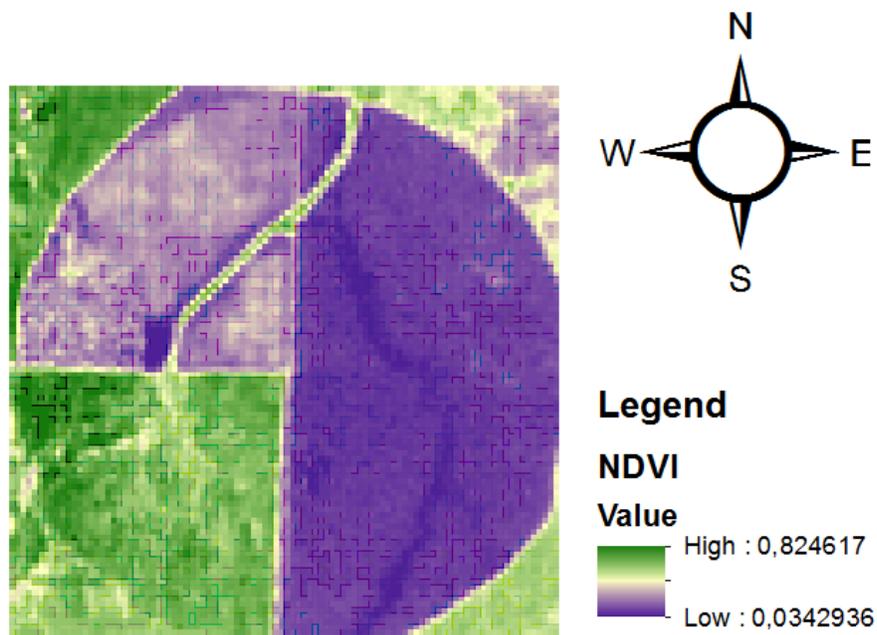


**Figura 10. Mapa temático del índice de salinidad determinado mediante teledetección en la máquina número 1 del polo productivo “La Julia”.**

Los valores de índice salino obtenidos y representados en la Figura 11 concuerdan con la investigación realizada por Soca *et al.* (2016) los cuales plantean que, los valores de este índice fluctúan entre -1,0 y 1,0; los valores cercanos a 1 indican un nivel bajo de sales, mientras que los valores de -1 hasta cercanos a 0 por la derecha representan niveles elevados de sales.

La Figura 11 muestra el mapa temático del NDVI determinado mediante teledetección en la máquina número 1 del polo productivo “La Julia”. Los valores que tomó dicho índice y como se aprecia en la figura, existe una amplia zona sin vegetación a la cual corresponden los valores de 0,03 hasta 0,5 y para las zonas con mayores coberturas de vegetación con un índice que va desde 0,5 hasta 0,8 resultados que concuerdan con lo planteado con Rawashdeh (2012) donde refiere que este índice, sus valores van desde -1 a 1 y que los valores más cercanos a 0 por la izquierda hacen alusión a la presencia de una escasa vegetación en la zona mientras que los valores más cercanos a 1 por la derecha coinciden con ser las zonas con mayor coberura vegetal.

De manera que los valores de NDVI sirven de indicador de las áreas afectadas por la salinidad, ya que la vegetación alta indicara que los niveles de salinidad se encuentran el niveles normales que no afectan el desarrollo de la vegetación, así mismo cuando la vegetación sea media o ligera quiere decir que están siendo afectados por la salinidad.



1: 10 000

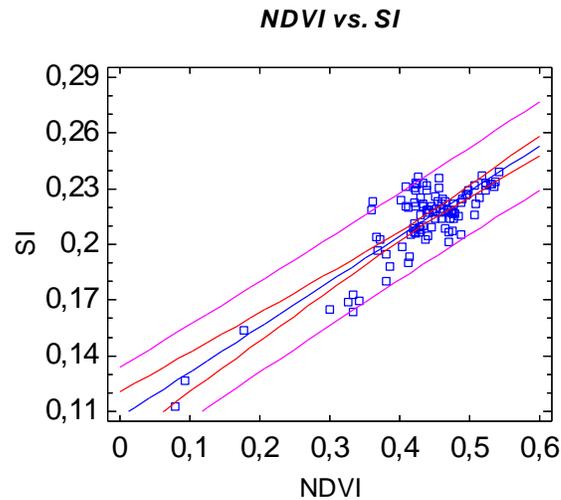
**Figura 11. Mapa temático del NDVI determinado mediante teledetección en la máquina número 1 del polo productivo “La Julia”.**

Soca *et al.* (2016) estimaron los valores máximos y mínimos del NDVI e Indsal de las imágenes TM y ETM+ para identificar los suelos con baja calidad agrícola y los suelos degradados por la salinidad. Los cuales nos permitieron verificar el nivel de vegetación en el distrito del mismo modo verificar las áreas afectadas por la salinidad. Donde en el área de estudio se tuvo los valores de NDVI fueron bajos debido a que el área en estudio se encontró siembra reciente de cultivo, donde no se puede apreciar con valor alto la vegetación. Estos valores tomados de la reflectancia de las bandas 4 y 5.

En la Figura 12 se muestra el modelo de regresión lineal obtenido del análisis de los valores de índice de salinidad y NDVI para lo cual se observó que existe una dependencia caracterizada por un modelo lineal entre las variables, con el mayor número de observaciones sobre la línea que se genera al ajustar los residuos generados de la predicción de dicha relación, lo que demuestra además una fuerte relación negativa entre las variables.

Se puede añadir que dicha relación negativa está dada principalmente por el efecto que trae consigo la salinidad del suelo a las plantas y por ende el decrecimiento de la cobertura vegetal en aquellos suelos donde se produce este problema de degradación.

La regresión es una técnica estadística que calcula dicha similitud en función matemática. Hay bastantes técnicas de regresión en función del tipo de variables y de forma funcional supuesta entre ellas. Las más primordiales y las más eficaces en lograr tener mayor información son las lineales. La regresión lineal es el vínculo entre dos variables que tienen un perfil lineal (Montenegro, 2016)



**Figura 12. Modelo de regresión lineal NDVI vs SI.**

Estudios realizados al respecto han utilizado otros modelos para caracterizar dicha relación. Ejemplo de ellos es el esquema conceptual de explicación de los efectos de la salinidad en los cultivos mediante el modelo bifásico propuesto por Munns y Termaat (1986) y discutido por (Munns, 1993).

En este modelo, el crecimiento de la planta es primero reducido por un incremento en el potencial hídrico del suelo y se regula por señales inhibitoras provenientes de las raíces. Así, la primera fase de reducción del crecimiento de la planta es un efecto de las sales fuera y no dentro de la planta.

Después, el efecto específico de las sales aparece como un daño producido por éstas en las hojas viejas, las cuales mueren debido a un incremento rápido en la concentración de sales en la pared celular o el citoplasma. Al inicio de la primera fase por tensión hídrica, las vacuolas de las células empiezan a acumular sales hasta que se saturan, por lo que no pueden continuar almacenándolas posteriormente. Al saturarse las vacuolas de sales, la pared celular o el citoplasma empiezan a acumularlas, pero con un efecto mayor en la reducción del crecimiento de la planta.

En lo general, el análisis de las reluctancias en el dosel de los cultivos ha sido enfocado, arbitrariamente, con técnicas empíricas que ignoran los principios de

transferencia de radiación en el dosel (Myneni *et al.*, 1989) y las propiedades biofísicas y bioquímicas de los cultivos y sus elementos constitutivos como clorofilas, carotenoides etc. (Jacquemoud, 1993).

En el aspecto del efecto de la salinidad en los cultivos, las técnicas utilizadas han sido similares. De esta discusión sobresale la necesidad de un modelo teórico-conceptual que permita comprender los resultados obtenidos de los muestreos, remotos o de campo/laboratorio, de las propiedades espectrales de los cultivos en ambientes de suelos salinos.

Los estadígrafos del análisis de regresión lineal se muestran en la Tabla 1. Dado que el valor P (significación) en la varianza de las observaciones es inferior a 0,03, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 99 %.

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) indica que el modelo ajustado explica el 71,25 % de la variabilidad en el modelo de NDVI vs. SI obtenido con un coeficiente de correlación ( $r^2$ ) de - 84,41 % para el cual se clasifica como una correlación negativa perfecta para valores cercanos al 100 %, es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes.

El error estándar de la estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,01 para un error absoluto medio (MAE) de 0,01 es el valor medio de los residuos. El estadígrafo de Durbin-Watson (DW) 0, 025 prueba que existe una correlación significativa dado que el valor P es inferior a 0,05 e indica una posible correlación serial.

**Tabla 1. Estadígrafos del análisis de regresión lineal.**

<b>Estadígrafo</b>	<b>Valor</b>
Coeficiente determinación (%)	71,25
Coeficiente de correlación (%)	- 84,41
Error Estándar	0,01
Error Medio Absoluto	0,01

Durbin-Watson	2,36 (P=0,025)
Autocorrelación residual	-0,18

---


$$SI = 0,107032 + 0,243138*NDVI$$


---

Badaracco (2012) desarrolló un estudio donde se identificó el grado salino en los suelos en plantas de algodón, para el estudio se utilizó datos de imágenes de un sensor satelital y su validación contra datos reales de conductividad eléctrica (CE) de la zona de estudio. Se estimaron distintos Índices espectrales de vegetación y de elevación para correlacionarlos con los datos de CE del suelo utilizando la técnica de regresión lineal simple y múltiple, de esta forma obtener un modelo para la estimación de salinidad. El estudio determina que la regresión lineal presenta resultados más cercanos que el de regresión lineal con un 89,0 % de coeficiente de determinación.

Becerra (2019) plantea en su investigación para estimar la salinidad a partir de imágenes de satélite de la cuenca del Río Chancay, el uso de un modelo de regresión no lineal DR-Weibull, que presenta una mayor bondad de ajuste ( $r^2 = 0.78$ ) y mejor expresión probabilística para estimar la salinidad del suelo, partiendo del NDVI.

La opción del monitoreo de las reflectancia de los cultivos para predecir su estado fisiológico, producto de las sales solubles en el suelo, permite la utilización de técnicas masivas de muestreo como los sensores remotos. Al respecto, existen trabajos (Abuzar *et al.*, 2001), donde se utilizan índices de vegetación que usan las bandas infrarrojas y visibles de los sensores remotos o utilizan una regresión estadística de la salinidad contra las bandas visibles para predecir el estado de la salinidad de los suelos.

Los resultados de este enfoque han sido inciertos, con coeficientes de correlación generalmente menores a 0.5. La explicación de estos resultados puede plantearse si se considera que el sensor remoto capta información espectral de una mezcla de suelo-planta-atmósfera, la cual al ser analizada con índices de vegetación o

similares produce una respuesta totalmente dependiente de la mezcla mencionada (Paz *et al.*, 2015).

## **CONCLUSIONES**

El uso de la teledetección para mapificar la salinidad en la máquina número 1 del polo productivo “La Julia” del agroecosistema Mayarí, mostró zonas con valores negativos del índice salino que corresponden a zonas con presencia de salinidad, principalmente en la zona donde se depositan los sedimentos del arrastre por la erosión hídrica que atraviesa el área.

La mapificación del estado de la vegetación mediante el NDVI arrojó zonas de baja presencia de cobertura vegetal con valores mínimos de 0,03 y máximos de 0,8 con una alta presencia de vegetación.

El modelo de regresión lineal obtenido mostró una dependencia lineal entre las variables, con un coeficiente de determinación de 71,25 % y de correlación negativa de -88,44 % cercanos al 100 % que justifican el uso del NDVI y el SI; como dos variables que pueden ser utilizados en la teledetección de la salinidad del suelo en las condiciones edafoclimáticas estudiadas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abuzar, M., A. McAllister, and M. Morris. 2001. Classification of seasonal images for monitoring irrigated crops in a salinityaffected area of Australia. *Int. J. Remote Sens.* 22: 717-726.
- Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M.: "Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos", Roma, Italia. FAO, p298, 2006.
- Araya, M. (2007). Correcciones de una imagen satelital ASTER para estimar parámetros vegetacionales en la cuenca del río Mirta, Aisén. *Bosque (Valdivia)*, 28(2), 162-172. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002007000200009>
- Asfaw, E., Suryabhadgavan, K. V., y Argaw, M. (2018). Soil salinity modeling and mapping using remote sensing and GIS: The case of Wonji sugar cane 100 irrigation farm, Ethiopia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(3), 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.05.003>
- Awad M. (1966) Las plantas en los suelos Salinos y Alcalinos. Simposio sobre Salinidad. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Dirección Regional para la Zona Andina-Programa de Zonas Áridas. Universidad Agraria, la Molina. p.1. Lima-Perú.
- Badaracco. (2013). *Clasificación de la salinidad del suelo mediante imágenes de satélite y las redes neuronales artificiales.*
- Basterra, I. (2011). Cátedra de fotointerpretación departamento de geociencias Facultad de Ingeniería–UNNE. <http://ing.unne.edu.ar/dep/goeciencias/fotointer/pub/teoria2011/parte02/tdi.pdf>
- Becerra, Mervin. 2019. Estimación del nivel de salinidad de los suelos de la cuenca del Río Chancay usando datos EVI y NDVI. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú, pp 103.

- Bocco, M., Heredia, S., Ovando, G., Sayago, S., Willington, E. (2009). Estimación de cobertura vegetal con redes neuronales a partir de imágenes de distintos satélites. In: X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR, Rosario, pp. 1250–1256.
- Bocco, M., Ovando, G., Sayago, S., Willington, E. (2013). Modelos simples para estimar cobertura de suelo agrícola a partir de Imágenes MODIS: aplicación a la zona central de Córdoba (Argentina). In: 42 JAIIO Congreso Argentino de AgroInformática, CAI 2013, Córdoba, pp. 61–69.
- DiBiase, D., Dutton, J., y Sloan, j. (2009). 14. Image Correction | The Nature of Geographic Information. Obtenido de: [https://www.eeducation.psu.edu/natureofgeoinfo/c8\\_p15.html](https://www.eeducation.psu.edu/natureofgeoinfo/c8_p15.html)
- FAO (2000) Manual de Practicas Integradas de Manejo y Conservación de Suelos. Boletín de Tierras y Aguas de la FAO. p.7. Roma.
- Hernández, J y Montaner, D (2009). Patrones de respuesta espectral, En: Lab. Geomántica y ecología de paisajes, Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile.
- Jacquemoud, S. 1993. Inversion of the PROSPECT + SAIL canopy reflectance models from AVIRIS equivalent spectra: Theoretical study. *Remote Sens. Environ.* 44: 281-292.
- Lau, Andrés. 2005. Metodología para la estimación de la salinidad de los suelos cultivados con caña de azúcar usando métodos de teledetección y redes neuronales artificiales. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Agraria de La Habana.
- Lazara Otero; et al. (2007) Caracterización y Evaluación de la Salinidad. Instituto de Suelos. Ministerio de Agricultura – La Habana Cuba. Recuperado el 04 de Diciembre del 2012, de <http://www.fao.org/docs/eims/upload/cuba/5420/salinidad.pdf>
- Metternicht, G. I., & Zinck, J. A. 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, 85. 1-20.

- Montenegro Granados, R. (2016). Modelos de regresión lineal múltiple.
- Mougenot, B., Pouget, M., & Epema, G. 1993 Remote sensing of salt-affected soils. *Remote Sensing Reviews*, 7, 241–259.
- Munns, R. 1993. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: Some dogmas and hypotheses. *Plant Cell Environ.* 16: 15-24.
- Munns, R. and A. Termaat. 1986. Whole-plant responses to salinity. *Aust. J. Plant Physiol.* 13: 143-160.
- Myneni, R. B., J. Ross, and G. Asrar. 1989. A review of the theory of photon transport in leaf canopies in slab geometry. *Agric. For. Meteorol.* 45: 1-165.
- Parra M. A.; R. Fernández – Escobar; C. Navarro y Otros. (2002). Los Suelos y La Fertilización del Olivar Cultivado en Zonas Calcáreas. Ediciones MundiPrensa. Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca. p.57. Madrid, España.
- Paz Pellat, F., L. A. Palacios Sánchez y C. Ramírez Ayala. 2018. Efecto de las sales solubles del suelo sobre las reflectancias de los cultivos y sus implicaciones en el diseño experimental. *Terra Latinoamericana* 36: 355-368. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.400>
- Paz, F., M. E. Romero, E. Palacios, M. Bolaños, J. R. Valdez y A. Aldrete. 2015. Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: análisis de índices de banda ancha. *Terra Latinoamericana* 33: 27-49.
- Peng, W, L. 1998. Synthetic analysis for extracting information on soil salinity using remote sensing and GIS: a case study of Yangao Basin in China. *Environmental Management*, 22, 153-159.
- Peréz, C., y Muñoz, Á. L. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Porta, J.; López-Acevedo, M. y Roquero, C.: (2003) Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3. a Edición. Ediciones Mundi-Prensa, 960 pp. Madrid. pág. 96,291, 292, 732y733.
- RAWASHDEH, S.B.A.: "Assessment of change detection method based on normalized vegetation index in environmental studies", International Journal of Applied Science and Engineering, 10(2): 89-97, 2012.
- Richards, L.A. (1985). Diagnóstico Y Rehabilitación De Suelos Salinos Y Sódicos. Departamento de Agricultura De los Estados Unidos de América (USDA). Laboratorio de Salinidad. Editorial Limusa.p.3. México.
- Ruiz, Jesús. (2008). Aplicación de técnicas hiperespectrales a imágenes multiespectrales (aster), para identificar superficies cultivadas con maíz, en la localidad de Sabaneta, estado Barinas. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Postgrado en Ciencia del Suelo, Especialización en Geomática. pp:84.
- Shahid, S. A., Zaman, M., y Heng, L. (2018). Soil Salinity: Historical Perspectives and a World Overview of the Problem. En M. Zaman, S. A. Shahid, y L. Heng (Eds.), Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques (pp. 43-53). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2)
- Sigueñas, Rodrigo.; Ocola, Leonidas.; Guerrero, Jhon.: "Vigilancia de la salinidad del suelo en cultivos de arroz en Lambayeque, periodo 2001-2014 utilizando imágenes de satélite y conductividad eléctrica", *Revista de Investigación de Física*, 22(2): 9-17. ISSN: 1728-2977.
- Soca, R. (2016). Identificación de tierras degradadas por salinidad del suelo en los cultivos de caña de azúcar en Pomalca usando imágenes de satélite. Facultad de Ciencias Físicas-Universidad Nacional de San Marcos, 1-156.
- Telesat (1999), Sistema para el seguimiento y análisis de tierra mediante la teledetección. En: Facultad de Agronomía e Ingeniera Forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile.

- Tipantuña, Lizeth. (2017). Propuesta metodológica para el análisis de la respuesta espectral en plantaciones de banano a la presencia de plagas y enfermedades, caso de estudio: cantón San Jacinto de Yaguachi, Sector Tres Postes, Provincia del Guayas. Disertación previa a la obtención del título de Ingeniera Geógrafa en Gestión Ambiental. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.Pp:144.
- Utset, A., Ruiz, M., Herrera, J., & Deleon, D. 1998. A geostatistical method for soil salinity sample site spacing. *Geoderma*, 86, 143–151.
- Vásquez, R. (2000) Influencia de la salinidad sobre el suelo, Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid – España.
- Wang, D., M. C. Shannon, and C. M. Grieve. 2001. Salinity reduces radiation absorption and use efficiency in soybean. *Field Crops Res.* 69: 267-277.
- Wild Alan (1989). *Condiciones del Suelo y Desarrollo de las Plantas Según Russell*. Ediciones Mundi-Prensa. p.972. Madrid, España.