

**FACULTAD DE
CIENCIAS NATURALES y AGROPECUARIAS**

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

**Título: Estimación de la conductividad eléctrica del suelo a
partir de información espectral en el cultivo del arroz
(*Oryza sativa* L.)**

Autor: Luis Ángel Feria Rodríguez

Tutores: Ing. Roberto Alejandro García Reyes

Dr.C. Mario Damian González Posada-Dacosta

Ms C. Juan Alejandro Villazón Gómez

Holguín 2021

RESUMEN

La salinidad del suelo constituye hoy en día uno de los principales procesos de degradación que afecta las tierras bajo riego; y en especial la producción de arroz. La investigación tuvo como objetivo estimar la conductividad eléctrica del suelo mediante información espectral en el cultivo del arroz en el municipio Mayarí, Holguín. La investigación se desarrolló sobre un Vertisol Crómico, los cuales son los más proclives en el territorio a desencadenar procesos de degradación como la salinidad, dado por las prácticas de manejo en el cultivo del arroz. Se utilizaron dos modelos semiempíricos propuestos a partir de índices espectrales diferentes, el NDSI y el SI los cuales se calcularon en el software QGIS 3.10 con imágenes multiespectrales del sensor Landsat 8 OLI/TIRS. El NDSI y el SI-ASTER arrojaron la menor determinación y correlación negativa en ambos modelos. El SI y el SI-ASTER producen una sobreestimación de los valores de conductividad eléctrica del suelo ($EC \geq 100\%$), el NDSI, SSSI.1 y el SSSI.2 indican un contenido moderado de sales en el suelo ($EC 20\% < EC \leq 40\%$). Aunque la utilización de los índices espectrales de salinidad arrojó una alta determinación, el SI y el SI-ASTER indicaron una sobreestimación de la conductividad eléctrica existente en el suelo lo cual podría deberse a la presencia de una saturación de la señal captada por el sensor y reflejada en los índices obtenidos, la cual sobrepasó los valores en los cuales oscila el índice salino.

ABSTRACT

The salinity of the soil constitutes today one of the main degradation processes that affects the lands under irrigation; and especially the production of rice. The objective of the research was to estimate the electrical conductivity of the soil by means of spectral information in the cultivation of rice in the Mayarí municipality, Holguín. The research was developed on a Chromic Vertisol, which are the most prone in the territory to trigger degradation processes such as salinity, given by management practices in rice cultivation. Two semi-empirical models proposed from different spectral indices were used, the NDSI and the SI, which were calculated in the QGIS 3.10 software with multispectral images from the Landsat 8 OLI / TIRS sensor. The NDSI and the SI-ASTER showed the lowest determination and negative correlation in both models. The SI and the SI-ASTER produce an overestimation of the electrical conductivity values of the soil ($EC \geq 100\%$), the NDSI, SSSI.1 and SSSI.2 indicate a moderate content of salts in the soil ($20\% < EC \leq 40\%$). Although the use of spectral salinity indices yielded a high determination, the SI and the SI-ASTER indicated an overestimation of the electrical conductivity existing in the soil, which could be due to the presence of a saturation of the signal captured by the sensor and reflected in the indices obtained, which exceeded the values in which the saline index oscillates.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
1. Degradación del suelo por salinidad.....	5
1.1. Proceso de salinización de los suelos	5
1.2. Causas de la salinidad primaria o natural en los suelos agrícolas.....	6
1.3. Causas de salinidad secundarias o antrópicas	7
1.4. Efectos de la salinidad sobre las propiedades de los suelos y las plantas.....	7
2. Generalidades del cultivo del arroz.....	8
2.1. Clasificación taxonómica del cultivo del arroz.....	8
2.2. Origen del arroz.....	10
2.3. Ecofisiología del cultivo del arroz	10
2.4. Fitotecnia del cultivo del arroz	12
2.5. Importancia del agua en el cultivo del arroz.....	12
2.6. Factores que afectan el rendimiento del arroz	13
2.7. Efecto de la salinidad del suelo en agroecosistemas arroceros	13
3. Técnicas geomática aplicadas a la agricultura	14
3.1. La teledetección o sensoramiento remoto	15
3.2. Efectos atmosféricos en las observaciones por satélite	19
4. Imágenes satelitales en estudios del arroz.....	23
MATERIALES Y MÉTODOS	24
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

INTRODUCCIÓN

En Cuba, el arroz es el alimento más común en la dieta de los cubanos, con una demanda nacional de 700 mil toneladas y un índice de consumo promedio de más de 70 kg por persona al año. Sin embargo, la producción nacional solo garantiza el 40 por ciento de esa demanda, por lo que el país está obligado a importar más de 400.000 toneladas de arroz anualmente (Reyes, 2019).

Ante esta situación, desde el año 2012 se lleva a cabo un programa integral de desarrollo que prevé antes del 2030 garantizar el 85 % de la demanda nacional, con la incorporación de nuevas zonas, la introducción de tecnología moderna y el incremento gradual del rendimiento en los campos, con el propósito de sustituir las importaciones, lo que contribuyó a alcanzar en 2018 más de 300 000 toneladas, el mayor registro histórico de producción de arroz en el país (Reyes, 2019).

Sin embargo, a pesar de la importancia del cultivo del arroz para Cuba, se cultiva mayoritariamente de forma tradicional, labranza basada en la grada de discos e inundación permanente, lo que contribuye a la degradación de los suelos. En las condiciones actuales de cambio climático, la producción arrocería en Cuba debe adaptarse para proveer de alimentos a la población de manera sostenible y a la vez necesita conservar y mejorar los suelos.

En Holguín se desarrolla el Programa Integral de Producción Arrocería en el municipio Mayarí, con el abasto de agua por el trasvase Este-Oeste se benefician 2000 ha anualmente para este cultivo.

El arroz está considerado entre los cultivos sensibles a la salinidad, y se ha señalado que a partir de una conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada del suelo (Cep) de $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ el rendimiento potencial declina rápidamente en un entorno de un 12% por cada incremento de unidad de la Cep del suelo (Ayers y Wescot, 1985 citado por Pujol *et al.*, 2009).

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 (Narváez *et al.*, 2014).

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 (Girón *et al.*, 2009).

La salinidad del suelo es considerado un problema a nivel medioambiental en el mundo, en especial en áreas de zonas áridas y semiáridas (Kumar *et al.*, 2018). Ha sido reportado en tierras agrícolas irrigadas de China, India, Estados Unidos y América (Zaman *et al.*, 2018), y alrededor de un 20 % de las tierras bajo riego en el mundo expresan severos daños por la salinidad, bajos rendimientos, causando la degradación del suelo y también la pérdida de la fertilidad (Ali *et al.*, 2019).

Queiroz *et al.* (2010), 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 (FAO, 2015).

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 (Fernández *et al.*, 2014).

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 (Fernández *et al.*, 2014).

De manera tradicional el análisis de laboratorio es la técnica de análisis utilizada para la caracterización de la salinidad del suelo, lo cual consume una gran cantidad de tiempo y recursos (Harti *et al.*, 2016). También se utilizan herramientas geoestadísticas de interpolación (Balakrishnan *et al.*, 2011) para el análisis de la variabilidad espacial y temporal de la información obtenida.

Ante esta situación se hace más factible la utilización del sensoramiento remoto o teledetección. Esta novedosa técnica de gran potencial para la toma de datos del suelo, y ha sido utilizada para la detección de la salinidad tanto en forma espacial como temporal (Allbed *et al.*, 2014). Su estudio se basa en las características espectrales del suelo.

Sidike *et al.* (2014), refiere que la reflectancia del suelo incrementa cuando incrementa la salinidad en el espectro visible de las bandas roja e infrarrojas. Dentro de las principales dificultades en la obtención de la información espectral de la salinidad es por la presencia de factores como la cobertura del suelo, el contenido de materia orgánica, la textura afectan la adquisición de la información en el tiempo y el espacio (Ding y Yu, 2014).

Por lo antes expuesto se plantea como ***Problema científico:***

¿Cómo estimar la conductividad eléctrica del suelo mediante modelos semiempíricos de información espectral en el cultivo del arroz, en el municipio de Mayarí, Holguín?

Hipótesis:

Los modelos semiempíricos de información espectral en el cultivo del arroz, permiten estimar la conductividad eléctrica del suelo.

Objetivo general:

Estimar la conductividad eléctrica del suelo, a partir de modelos semiempíricos de información espectral en el cultivo del arroz en el municipio de Mayarí, Holguín.

Objetivos específicos:

- Determinar índices espectrales relacionados con la salinidad del suelo en el área de estudio.
- Estimar la conductividad eléctrica a partir de los valores obtenidos de los índices espectrales en los puntos muestreados.
- Clasificar el estado de la salinidad a partir de la estimación de la conductividad eléctrica por teledetección.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Degradación del suelo por salinidad

La actividad antrópica ha incrementado la extensión de áreas salinizadas al ampliarse las zonas de regadío con el desarrollo de grandes proyectos hidrológicos, los cuales han provocado cambios en la composición de sales en el suelo (Fernando, 2019).

Los suelos salinos son aquellos que contienen cantidades importantes de sales más solubles que el yeso, lo que interfiere con el crecimiento de la mayoría de los cultivos y plantas sensibles. La salinidad se mide por medio de la Conductividad Eléctrica (CE) en la solución intermicelar o solución del suelo, y el umbral para considerar que un suelo es salino se ha establecido en $CE > 4 \text{ dS.m}^{-1}$ a 25°C .

En la década del 90 se estimaba que la proporción de suelos afectados por salinidad estaba alrededor de un 10 % del total mundial y que entre un 25 y un 50 % de las zonas de regadío estaban salinizadas. En la actualidad, no existe referencia alguna de los niveles de áreas afectadas por este factor, pero, sí está claro, que esta situación se agudiza cada día más en las áreas cultivadas a nivel mundial, producto de la falta de conciencia medioambiental y de la explotación de los recursos hídricos irracionalmente, además de otros factores edafoclimáticos que influyen directamente sobre la salinidad de los suelos como, por ejemplo, el desmonte de tierras para volcarlas a la producción, esto conlleva a un ascenso de sales de la capa freática.

Más de 800 millones de hectáreas de suelo son afectadas por salinidad y sodicidad a lo largo del mundo, lo que es equivalente a más del 6% del área total mundial y aproximadamente el 20% del área cultivable total. Este porcentaje podría incrementar se a un 50% del total de suelo cultivable en el 2050. A partir de estos números podemos dimensionar que es un tema de suma importancia y cada vez requerirá mayores estudios.

1.1. Proceso de salinización de los suelos

Al disminuir las lluvias, en los sectores planos y deprimidos, los suelos se van secando por infiltración y evapotranspiración. Es entonces cuando comienza a

generarse el proceso de salinización quedando interrumpido el ciclo productivo en amplias superficies de la región. En este proceso, se pueden reconocer tres fases: la primera de ellas se relaciona con el ascenso de la solución salina por capilaridad. La evapotranspiración se incrementa con el aumento de las temperaturas y vientos de primavera, actuando como una verdadera bomba que succiona en forma ascendente a la solución salina, a través del espacio poroso del suelo. La segunda fase consiste en la concentración salina en el horizonte superficial en función de los factores mencionados anteriormente. La tercera fase del proceso de salinización es la formación de las costras salina en superficie, que es particularmente visible en épocas calurosas, ventosas y secas. Estas eflorescencias y costras salinas expresan el grado más intenso de salinización y en estos suelos, se superan los 20 ds.m^{-1} de conductividad eléctrica (Casas y Rossi, 2011).

El problema más común de afectación de estos suelos por sales y sodio se debe principalmente a la presencia de bicarbonato de sodio que se acumula en superficie, transformándose en parte a carbonato de sodio provocando una fuerte alcalinización de los suelos con pH por encima de nueve. La presencia de sodio provoca la dispersión de las arcilla y la materia orgánica, cuya consecuencia es la compactación de los suelos que se tornan duros en seco e impermeables en húmedo. La situación consignada afecta el crecimiento y desarrollo de muchas especies vegetales al limitar el crecimiento de las raíces por la resistencia mecánica y falta de aireación en el suelo. El resultado final es la formación de suelos sódicos del tipo conocidos como “álcali negro” debido a la presencia de materia orgánica dispersa en superficie, con pH superiores a nueve y con problemas de disponibilidad de algunos nutrientes tales como el fósforo y los microelementos (Casas y Rossi, 2011).

1.2. Causas de la salinidad primaria o natural en los suelos agrícolas

La principal causa natural de salinidad de los suelos es el ascenso capilar de napa freática con características salinas, siendo la fuente de salinidad la meteorización del material original del suelo de naturaleza salina. En este caso el micro relieve juega un rol determinante en la presencia de mayor o menor cantidad de sales.

Este fenómeno está asociado a regiones áridas, semiáridas y estepas, donde la precipitación es menor a la evapotranspiración potencial, generando un balance hídrico negativo. Sin embargo, también puede aparecer en lugares con prolongados períodos de sequía, como en zonas climáticas templadas y tropicales secas.

Otra causa natural de salinización de los suelos es la cercanía al mar. Zonas costeras que normalmente son inundadas con agua de mar, reciben constantemente aporte de sales, lo cual lleva a estos suelos a la salinización.

1.3. Causas de salinidad secundarias o antrópicas

El origen de este tipo de salinización puede ser por:

- I. Riego con aguas salinas.
- II. Mal uso del riego (aunque las aguas sean de buena calidad) que provocan ascensos de capas freáticas salinas.
- III. Uso de fertilizantes (algunos fertilizantes contienen altos niveles de sales que son potencialmente perjudiciales, tales como cloruro de potasio o sulfato de amonio) y otros insumos, especialmente en zonas de agricultura intensiva en las que el suelo es poco permeable y las posibilidades de lixiviación son limitadas.
- IV. Contaminación de suelos por uso de agua y subproductos industriales salinos (por ejemplo, riego con vinaza).
- V. Cambio brusco del uso de la tierra (por ejemplo, desmonte) que provoca revenimientos salinos desde profundidad hacia las capas superficiales del suelo.

1.4. Efectos de la salinidad sobre las propiedades de los suelos y las plantas

Los procesos de salinización se presentan en suelos con régimen de humedad ascensional epipercolativo (humedad ascensional) donde la evapotranspiración potencial supera a las precipitaciones, con translocaciones capilares ascendentes a partir de una napa freática salina (halohidromorfismo) y una dinámica de lixiviado restringido en época de lluvias.

Estos procesos pueden tener lugar en **ambientes áridos y semiáridos**. Por lo general las sales tienden a acumularse en posiciones topográficas de fondo, con drenaje deficiente a donde han sido llevadas por el agua de escorrentía superficial o subsuperficial.

1.4.1. Efectos sobre propiedades edáficas

Físicas: La salinización es un proceso mediante el cual tiene lugar la acumulación de sales, por lo general, cloruros y sulfatos de sodio y magnesio, lo que provoca una concentración elevada en la fase líquida del suelo. Esta alta concentración tiene un efecto físico favorable en los suelos ya que la doble capa eléctrica constituida por la micela coloidal y la nube de contraiones y coiones que neutralizan cargas) se encuentra comprimida lo que favorece el proceso de floculación.

Esto se traduce en una buena fertilidad física de los suelos salinos (hay formación de agregados y eso es estructura).

Químicas: En un suelo salino la elevada concentración de iones Na^+ y Cl^- , produce una interferencia en la absorción de nutrientes (K^+ , Ca^{2+} , NO_3^-) e impide la captación de los mismos, lo cual puede alcanzar niveles tóxicos para el metabolismo celular.

1.4.2. Efectos sobre las plantas

Los efectos sobre las plantas dependen tanto de la tolerancia de cada especie y cultivar, como también del estado de desarrollo de la misma. La acumulación de sales más solubles que el yeso en la cama de siembra, puede provocar un retardo o una inhibición en la emergencia, un tamaño menor de la planta, necrosis en las hojas, disminución de rendimientos y la muerte de la planta antes de completar el ciclo. Ello podría deberse a efectos osmóticos que dificultan la absorción de agua (sequía fisiológica) y a efectos ión-específicos origen de diferentes toxicidades.

2. Generalidades del cultivo del arroz

2.1. Clasificación taxonómica del cultivo del arroz

El arroz pertenece a la siguiente clasificación taxonómica según (Barzola, 2012):

Reino: *Plantae*

División: *Anthophyta*

Clase: *Monocotyledoneae*

Orden: *Cyperales*

Familia: *Poaceae*

Género: *Oryza*

Especie: *Oryza sativa*

Nombre Científico: *Oryza sativa L.*

Es una planta autógama, que posee dos tipos de raíces: las seminales (temporales) y las adventicias (permanentes). El tallo es redondo y hueco, compuesto por nudos y entrenudos en un número variable. Los cinco entrenudos superiores se prolongan de manera creciente a fin de llevar la inflorescencia sobre la planta.

En cada nudo del tallo se desarrolla una hoja, en la que se distinguen la vaina, el cuello y la lámina; en el cuello se encuentra la lígula y las aurículas que fijan la hoja al tallo a manera de protección. La lámina es de tipo lineal, larga y más o menos angosta según las variedades, el haz tiene venas paralelas con nervadura principal prominente. La presencia de vello en las hojas y de pigmentación antociánica en los márgenes, o en toda la lámina son caracteres varietales (CIAT, 2010).

La vida de las hojas es corta y para la época de floración solamente hay 4 a 5 hojas verdes en cada tallo y de ellas las dos hojas superiores son responsables de la fotosíntesis de un 75 % de los carbohidratos que van al grano.

La inflorescencia es una panícula situada sobre el nudo apical, el fruto del arroz es una cariósida donde el ovario maduro seco e indehisciente, consta de la cáscara formada por la lemma y la palea que protegen al embrión, situado en el lado ventral cerca de la lemma y el endospermo que provee alimento al embrión durante la germinación (INIAP, 2007).

2.2. Origen del arroz

El lugar geográfico de origen y domesticación del arroz no está todavía definitivamente establecido. Diversos historiadores y científicos concuerdan en que el origen del arroz es el sudeste de Asia. La India, una de las regiones de mayor diversidad es donde existen numerosas variedades endémicas. Las provincias de Bengala y Assam, así como Myanmar, han sido indicadas como centros de origen de esa especie (Embrapa, 2004). El consenso general es que la domesticación del arroz ocurrió independientemente en China, India e Indonesia, otorgándole por consiguiente tres líneas de arroz: Sínica (también conocido como japónica), índica y javánica (también conocido como bulu en Indonesia).

El género *Oryza* es el más rico e importante de la tribu *Oryzaceae* y engloba cerca de 23 especies. Fue rápidamente dispersado de sus hábitats tropicales (del sur y sudeste de Asia) y subtropicales (del sudoeste y sur de China) a altitudes y latitudes superiores en Asia, llegando a Japón hace unos 2300 años (Chang, 1983).

La especie *Oryza sativa* es considerada polifilética, resultante del cruzamiento de formas espontáneas variadas. El arroz fue introducido en lugares tan lejanos como el oeste de África, América del Norte y Australia en los últimos seis siglos. Hasta su introducción por los árabes en el Delta del Nilo, el arroz no era conocido en los países Mediterráneos. El arroz fue cultivado en el siglo VIII en España y Portugal y en el sur de Italia entre el siglo IX y X (Lu y Chang, 1980). Fueron, probablemente, los portugueses quienes introdujeron este cereal en África Occidental, y los españoles, los responsables de su diseminación en América.

2.3. Ecofisiología del cultivo del arroz

El arroz se cultiva en una diversidad de condiciones ambientales que van desde los 45 grados de latitud norte a los 40 grados de latitud sur y desde el nivel del mar hasta 2500 metros de altitud. Se considera que es un cultivo especial para zonas húmedas de los trópicos o para climas de temperaturas altas. Estas condiciones permiten que en las áreas arroceras tanto la temperatura, longitud del día como

también las condiciones de disponibilidad de agua sean muy diversas (Juliano, 1993).

Altas temperaturas, abundante radiación solar y disponibilidad de agua son requisitos fundamentales en la producción de arroz. Las variedades de arroz se comportan de manera diferente en los distintos ecosistemas de producción, esto es, en su interacción con el medio ambiente -clima, suelo, prácticas de cultivos y agentes biológicos que la afectan.

Los métodos de producción de arroz van desde los más primitivos a los altamente mecanizados (De Datta, 1988), y se destacan aquellos realizados en ecosistemas con riego y los de secano.

Los ecosistemas con riego tienen mayores rendimientos ya que el agua controlada en el riego reduce los factores limitantes del cultivo, siendo estos ecosistemas menos complejos, más estables y uniformes que los de secano. La inundación del suelo crea condiciones físicas, químicas y biológicas diferentes de aquellas existentes en suelos secos o drenados. Diversas fuentes (Reddy *et al.*, 2000) coinciden en señalar que estas condiciones influyen sobre los siguientes aspectos:

- Absorción de nutrientes por la planta de arroz
- Disponibilidad y pérdida de nutrientes
- Retardo en el intercambio gaseoso entre el suelo y el aire
- Reducción del suelo
- Cambios electroquímicos y químicos que acompañan a la reducción del suelo, tales como:
 - i. incremento del pH en suelos ácidos y disminución en los calcáreos
 - ii. pérdidas de nitrógeno por denitrificación
 - iii. acumulo de sustancias resultantes de la actividad de los microorganismos anaeróbicos
 - iv. reducción del hierro y manganeso, aumentando así la cantidad aprovechable por el cultivo
 - v. aumento en la disponibilidad de nutrientes tales como fósforo y silicio
 - vi. acumulación de amonio

- Fijación del nitrógeno del aire por bacterias, algas verde azules
- Control de malezas
- Eliminación del estrés por sequía
- Facilidad en la nivelación del suelo
- Reducción de la intensidad de plagas, enfermedades y desordenes fisiológicos

2.4. Fitotecnia del cultivo del arroz

La preparación del terreno puede realizarse en seco o mojado. En las áreas donde el arroz se cultiva por el método de siembra directa, la preparación del suelo se realiza en seco y de forma similar que para otros cultivos y las operaciones de labranza consisten en arar, rastrillar y nivelar para luego realizar la siembra. En áreas húmedas, mal drenadas y de difícil drenaje la preparación del suelo se realiza por el método denominado fanguero.

En este sistema, las operaciones de labranza se realizan bajo agua y el arroz es trasplantado o bien se realiza la siembra con semillas pregerminadas. En ambos casos el agua de irrigación es mantenida en el campo por medio de camellones o taipas. En cuanto a los ecosistemas de secano son más difíciles de manejar y son aquellos en que el cultivo de arroz depende de las lluvias para su normal crecimiento, y además carecen de la sistematización para la retención de una lámina de agua sobre su superficie.

La ausencia de una lámina de agua produce interacciones entre las variedades y la nutrición mineral (deficiencias en elementos menores y desbalances en los macroelementos), las sequías, las plagas y enfermedades, dando como resultado un complejo de factores limitantes diferentes a los ecosistemas irrigados.

2.5. Importancia del agua en el cultivo del arroz

Uno de los insumos más importante para cualquier cultivo y en especial el arroz, sin lugar a dudas es el agua (PNUD, 2016). En el último decenio se han evidenciado disminuciones drásticas de los volúmenes de agua en los embalses, debido a las prolongadas y frecuentes sequías influenciadas por el cambio

climático, afectando de esta manera a la producción de los cultivos y en especial al arroz, el cual demanda un volumen importante del preciado líquido.

En un futuro no muy lejano, de continuar los bajos volúmenes de precipitaciones, habrá que recurrir al uso adecuado y cuidadoso del agua de mar, como alternativa para mitigar la escases de agua para la producción de arroz.

Una manera importante de incrementar de manera sostenible la producción de arroz en el país y un ahorro del recurso agua, es haciendo uso del cultivo de arroz de rebrote, o también conocido como soca o retoño, con el que se alcanzan rendimientos aceptables y es una actividad viablemente económica.

2.6. Factores que afectan el rendimiento del arroz

Son muchos los factores que afectan el rendimiento del arroz y su calidad industrial, destacándose, el momento en que se cosecha y el manejo del riego previo a la misma, produciéndose disminución en los porcentajes de granos enteros, la cantidad de panículas por metro cuadrado y en el propio rendimiento agrícola (de Ávila *et al.*, 2015).

Por otra parte, en la evaluación de las condiciones agrometeorológicas para la producción arroceras en Cuba, Delgado (2012) considera que la acción combinada de las variables climáticas siguientes: temperatura, humedad relativa del aire, fuerza del viento, brillo solar y precipitaciones tienen un efecto determinante en el cultivo del arroz en condiciones de producción.

Al respecto, Rivero-Vega *et al.* (2018) refieren que el descenso de la temperatura y el decrecimiento de la radiación solar conducen al incremento de los rendimientos potenciales del arroz.

2.7. Efecto de la salinidad del suelo en agroecosistemas arroceros

En nuestro país como en muchos lugares del mundo la presencia de cantidades excesivas de sales en la solución del suelo o el alto contenido de sodio intercambiable está limitando grandemente la producción arroceras, hasta el punto de abandonarse extensas áreas, las que de poseer un grado normal de fertilidad

podrían brindar producciones que necesitamos con una adecuada rentabilidad. Estos suelos se caracterizan por presentar propiedades físico-químicas desfavorables que limitan el crecimiento y desarrollo de los cultivos que en ellos se establecen, por lo que necesitan prácticas especiales para su mejoramiento y manejo (Román *et al.*, 2006).

Al respecto se ha señalado que para el mejoramiento y el manejo de los mismos, se debe elaborar un plan estratégico donde se tenga en cuenta los recursos disponibles y se busque una recuperación en plazos razonables. Dentro de este plan deben tenerse en cuenta medidas alternativas que contrarresten los efectos perjudiciales de la salinidad y/o sodicidad presente en los suelos arroceros, medidas agrotécnicas tales como: uso de variedades tolerantes a esas condiciones; manejo adecuado del agua de riego; establecimiento de los sistemas óptimos de drenaje; utilización de biorreguladores del crecimiento y empleo de mejoradores orgánicos y químicos así como la rotación de cultivos entre otras (Román *et al.*, 2006).

3. Técnicas geomática aplicadas a la agricultura

Las tecnologías Geomáticas, Geoinformáticas o de Geoinformación, como se prefiera nombrarlas, son un conjunto de tecnologías geoespaciales, así como programas informáticos especializados empleados en el análisis de los datos sobre la tierra y su representación espacial. Hoy en día sería casi imposible gestionar los procesos agrarios sin recurrir al empleo de alguna de ellas, ya que los profesionales modernos de las ciencias agropecuarias, están necesitados de apreciar y evaluar acciones que provocan las fuerzas productivas y la naturaleza sobre la producción agropecuaria (Ponvert *et al.*, 2012).

Estas incluyen a los Sistemas Geodésicos de Referencia, los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), la Cartografía, la Fotogrametría, la Teledetección Espacial y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Las mismas, se sustentan en los sistemas de conocimientos, teorías y conceptos de las ciencias matemáticas, física, química, la astronomía, la geodesia física y la tecnología

espacial; así como en el uso y manejo de bases de datos, computación gráfica y la inteligencia artificial (Konecny, 2003).

La tendencia contemporánea en países desarrollados y en muchos países en vías de desarrollo es introducir y aplicar en un grado cada vez mayor estas tecnologías en los distintos procesos de la gestión agraria. Es lo algunos llaman la “geomatización de la agricultura”. En el caso particular de Cuba, la introducción de estas técnicas ha sido muy lenta, dado por varios factores entre los que cabe citar, en primer lugar, la falta de competencias y capacidades en parte del capital humano de las entidades agropecuarias (Ponvert *et al.*, 2012).

También, ha influido el costo relativo de estas tecnologías, productos derivados y servicios en el mercado internacional, y la inexistencia de una política adecuada que permita la introducción paulatina de las tecnologías y la formación de capacidades en los futuros técnicos, directivos y especialistas del sector. Aún con estas limitantes, en algunas entidades se aprecia el interés por su introducción y algunos resultados modestos.

Entre las aplicaciones tradicionales claves en áreas especiales de interés económico y profesional, una de las herramientas de Geoinformación que ha adquirido un desarrollo significativo en los últimos años ha sido la teledetección.

3.1. La teledetección o sensoramiento remoto

El principio físico de la percepción remota o teledetección, se basa en la ley de la conservación de la energía, mediante la cual una vez la energía llega a la superficie de la Tierra, una parte es absorbida, otra transmitida y otra reflejada. Durante la transmisión a través de un objeto la energía es absorbida selectivamente por los componentes químicos del objeto y luego es reflejada. En el caso de las plantas, la energía transmitida a una hoja sufrirá una absorción selectiva por los pigmentos de la hoja como la clorofila y luego será reflejada desde las paredes celulares (McCloy, 1995).

Estas características son la base para identificar los objetos mediante sensores que pueden captar la energía reflejada por los cuerpos y convertirla en valores digitales. En particular, las imágenes de satélite almacenan las señales

espectrales en diferentes longitudes de onda, y después de diversos análisis se efectúa la interpretación; de allí se obtiene la información sobre las características y los tipos de objeto presentes en el área de estudio.

3.1.1. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de ondas que según el valor de su frecuencia reciben una denominación especial: ondas de radio, microondas, ondas infrarrojo, visible (luz), ultravioleta, rayos (x) y rayos gama. Esta onda electromagnética es la propagación simultánea de los campos eléctrico y magnético producidos por una carga eléctrica en movimiento, que no necesita un medio para propagarse, ya que puede transmitirse en el vacío o cualquier otro medio, y a la misma velocidad.

Los límites de las regiones dentro del espectro electromagnético son más o menos arbitrarios y dependen de la capacidad para poder producir o detectar dichas áreas. Las unidades de medida que se emplean para estas ondas van desde las micras (μm) para las más cortas, mientras que para las más largas se usa el centímetro o metro; estas últimas se emplea valores de frecuencia en hercios (Hz).

Las ondas de radio reciben esta denominación debido a que se las usa para la transmisión de radiocomunicación o radiodifusión, presentan frecuencias bajas de 102 hasta 108 Hz (o ciclos). Las microondas presenta frecuencias de 109 a 1011 Hz se emplean mucho en las telecomunicaciones para las señales de tv o transmisiones telefónicas por medio de satélites estacionarios (Fontal, 2005).

En la región del infrarrojo las frecuencias oscilan entre 1011 y 1014 Hz; los átomos se encuentran en constante e intensa vibración provocando calor, y emitiendo la radiación infrarroja; el infrarrojo frecuentemente se subdivide en cuatro subregiones: Infrarrojo cercano (NIR, 780-3000 nm), Infrarrojo (MWIR, 3000-6000 nm), Infrarrojo lejano (LWIR, 6000-15000 nm) y el extremo infrarrojo (0,015-1,0 mm).

En la “región visible” del espectro electromagnético llamada así porque es la única radiación perceptible por el ojo humano, según Chuvieco (2010), constituye una región estrecha con frecuencias que van desde 670 hasta aproximadamente 460

nm; en la que suelen distinguirse tres bandas elementales, denominadas azul (0.4 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm).

3.1.2. Interacción de la radiación y la materia

Cuando se produce la interacción de la materia con la radiación incidente o irradiancia pueden sufrir los siguientes procesos: absorbanancia, transmitancia, reflectividad, refracción y dispersión. Se conoce como absorción a la fracción de la radiación incidente de una longitud de onda específica del espectro, que es absorbida por un material, y a la diferencia entre la energía total que incide y la energía absorbida como reflectividad o energía que se refleja; la transmitancia es la porción de energía incidente que es transmitida por dicho objeto; mientras que al cambio de dirección de la onda de luz al pasar a través de un material a otro se lo conoce como refracción (De la Cruz, 2008).

La proporción de energía en cada uno de estos procesos puede variar dependiendo el tipo de superficie, material y condición del objeto que está recibiendo dicha radiación y son estas diferencias las que mediante teledetección permiten discriminar un objeto de otro. La radiación que proviene directamente del sol (en línea recta) se la conoce como radiación directa y la radiación difusa es la que proviene de diversas direcciones al haber sido reflejada, desviada o dispersada por las nubes, la turbidez atmosférica, los accidentes topográficos o simplemente haber sido difundidos el atravesar un material transparente o traslucido (Hernández *et al.*, 2001).

En las plantas la radiación directa es recibida por las hojas superiores o altas provocando sombra en las partes bajas, sin embargo, la radiación difusa al ser adireccional penetra mejor en el cultivo llegando especialmente a las hojas inferiores. La señal lumínica detectada por los sensores es la energía reflejada y transmitida, del total de radiación incidente. Cada material, suelo, vegetación, agua, etc. refleja la proporción de radiación recibida de diferente manera (De la Cruz, 2008).

Esto depende directamente del tipo de superficie del material u objeto, según Cabello *et al.* (2003) existen dos tipos de superficies: aquellas que reflejan la

radiación solar directamente con un ángulo igual al ángulo incidente (superficies especulares) y aquellas que reflejan la radiación hacia todas las direcciones (superficies lambertianas).

Las características de reflectancia, están íntimamente asociadas a la composición misma de los cuerpos naturales, tanto en sus propiedades químicas como físicas, lo que se denomina “respuesta espectral” que es propia de cada elemento y permite distinguirlos entre sí (Enoki *et al.*, 1999).

3.1.3. Comportamiento espectral del agua

El agua es muy buena trasmisora de la radiación electromagnética en el espectro visible y de absorción en el infrarrojo. En la curva de reflectividad se muestra un pico en la región del verde que va reduciéndose hasta el infrarrojo, y es esta característica la que permite diferenciarla entre aéreas de tierra. La reflectividad del agua líquida permanece sujeta a: la profundidad, los materiales del fondo o en suspensión (Clorofila, arcillas y nutrientes) y la rugosidad de la superficie (Sobrino, 2001).

Cuando el agua presenta turbidez la respuesta espectral depende del tipo de turbidez, por ejemplo si se trata de fitoplancton aparecerán importantes alteraciones en el verde (aumenta) y en el azul (disminuye), la rugosidad de la superficie favorece a la reflexión difusa, en el caso de aguas con superficie tranquilas presentan una radiación especular (Quirós, 2013).

3.1.4. Comportamiento espectral del suelo

Tanto en rocas como en suelos la reflectancia aumenta a medida que se va incrementando la longitud de onda desde el intervalo del visible del espectro electromagnético al infrarrojo cercano (Pérez y Muñoz, 2006).

Según Stoner y Baumgardner (1981), los factores que condicionan la reflectividad de los suelos son: contenido de humedad, textura, estructura, la composición, predominio de materia orgánica, el contenido de óxidos en el suelo.

El color del suelo está determinado por el contenido de óxido de hierro y la cantidad de materia orgánica, el tipo de textura determina la capacidad de retención de agua; la reflectividad es mayor para suelos más finos y apelmazados.

En cuanto al contenido de agua los suelos secos poseen mayor reflectividad que los húmedos.

3.1.5. Comportamiento espectral de la vegetación

La radiación solar controla los procesos de fotosíntesis, morfogénesis y regula en mayor o menor medida otros procesos como la respiración, movimientos estomáticos, metabolismos del carbono entre otros (Benavides y Homero, 2002). Según Hernández *et al.* (2001) y De la Cruz (2008), la radiación PAR (Photosynthetically Active Radiation) o radiación fotosintéticamente activa, coincide aproximadamente con la radiación solar visible, que está comprendida entre los 400 y 700 nm y corresponde a la porción aprovechable que tiene influencia sobre el proceso fotosintéticos, interviniendo en el flujo de fotones. Las propiedades reflectivas de la vegetación dependen de tres tipos de variables:

- Estructura de la cubierta vegetal, caracterizadas por el índice de área foliar, orientación de las hojas y por su distribución y tamaño.
- Propiedades ópticas de los elementos reflectantes (tallos, hojas, flores y frutos).
- Geometría de la observación, directamente relacionado con la posición geográfica de la planta: pendiente, orientación relativa entre el sol, asociación con otras especies, reflectividad del sustrato, geometría de plantación, condiciones atmosféricas.

3.2. Efectos atmosféricos en las observaciones por satélite

En el manual del 6S por Vermote *et al.* (2006) define los efectos atmosféricos como el cambio en la intensidad de radiación electromagnética en una determinada longitud de onda, por efectos de la absorción y *scattering* por las moléculas y aerosoles presentes en la atmósfera. La absorción por los gases atmosféricos en el espectro solar se debe principalmente a:

- Oxígeno
- Ozono
- Vapor de agua
- Bióxido de carbono

- Metano
- Óxido nitroso

Estos elementos químicos se pueden considerar constantes y uniformemente mezclados en la atmósfera, la concentración de oxígeno y agua, dependen de la ubicación y el tiempo. Los gases absorben la radiación mediante cambios en los estados rotacionales, vibratorios o en el nivel de energía de los electrones. La energía de rotación es débil y corresponde a la emisión o absorción de fotones de frecuencia amplia, que se ubica en la porción de microondas e infrarrojo lejano del espectro electromagnético.

La transición vibratoria es más fuerte que la rotación y extiende su rango de absorción hacia el infrarrojo cercano. Finalmente la transición de los estados de energía de los electrones es muy fuerte lo que provoca bandas de absorción en la porción ultravioleta y visible del espectro electromagnético.

Dado que las transiciones en los niveles de energía ocurren en valores discretos (saltos cuánticos), los coeficientes de absorción varían rápidamente con la frecuencia y presentan una estructura compleja, se muestran como líneas de absorción del espectro electromagnético.

3.2.1. Corrección atmosférica

Las imágenes de la superficie terrestre, adquiridas en el espectro solar y que son tomadas por satélite de observación, se encuentran contaminadas por la luz solar dispersada hacia el sensor por las moléculas atmosféricas, los aerosoles y las nubes en suspensión. Además, la energía solar que es reflejado desde la Tierra se encuentra atenuada por los efectos atmosféricos.

Estos efectos atmosféricos son dependientes de la longitud de onda, siendo variables en tiempo y espacio, así mismo de la reflectividad de la superficie y su variación espacial. La corrección de estos efectos atmosféricos puede producir señales de teledetección que se encuentran mejor correlacionadas con las características de la superficie (*Borengasser et al., 2008*).

3.2.2. Fuentes de distorsión geométrica en imágenes

Las imágenes obtenidas por teledetección contienen distorsiones geométricas debido a muchos factores y pueden clasificarse en sistemáticas y no sistemáticas (*Richard y Jia, 2006*).

Las distorsiones son sistemáticas, tales como el **sesgo de escaneado**, causado por el movimiento de avance de la plataforma durante el tiempo requerido para cada barrido del espejo; **velocidad del espejo de escaneado**, la velocidad de éste usualmente no es constante durante un dado ciclo, produciendo una distorsión geométrica a lo largo del escaneado; **efectos panorámicos y curvatura terrestre**, el efecto panorámico deriva del hecho de que los sensores de plataformas satelitales el IFOV (instantaneous field of view) angular es constante, el tamaño del pixel sobre el terreno será mayor en los extremos de la oscilación que en el nadir, también la curvatura terrestre conduce a un efecto similar, aunque para satélites de barrido poco extenso, como el Landsat (185 km) o el SPOT (120 km) el efecto es despreciable, a diferencia de lo que ocurre con los NOAA, con 2700 km de FOV (field of view); **velocidad de la plataforma**, si la velocidad de la plataforma cambia, la cobertura terrestre a lo largo de su traza terrestre para sucesivos escaneos también cambiará, se producirá una distorsión de escala a lo largo del trayecto; **rotación de la Tierra**, a medida que el sensor escanea el terreno la Tierra se desplaza de oeste a este, de modo que un punto del terreno registrado al fin del escaneado va a estar más al oeste que cuando comenzó el barrido.

Como casos de distorsiones geométricas no sistemáticas se tiene los efectos por altitud y actitud; **altitud**, si la plataforma se desvía de su altitud normal o si aumenta la elevación del terreno se producen distorsiones de escala; **actitud**, hace referencia a la orientación del satélite en el espacio tridimensional en que se desplaza.

En tal sentido podemos definir un sistema de tridimensional de coordenadas ortogonales centrado en el centro de gravedad de la plataforma considerada. De acuerdo con esto puede definirse la orientación de la plataforma por la

contribución de los movimientos respecto a estos ejes principales. Estos movimientos se definen como: balanceo (roll), cabeceo (pitch) y desvío (yaw).

3.2.3. Corrección geométrica

La corrección geométrica implica un proceso de transformación para situar biunívocamente cada píxel de las diferentes imágenes, en su correcta posición geográfica de la superficie terrestre. La necesidad de realizar este tipo de corrección surge por las diferentes distorsiones que pueden darse por las condiciones del desplazamiento y adquisición de la información en la plataforma satelital (*Sobrino, 2000*).

Los procedimientos matemáticos que resuelven este problema y las metodologías usadas para su implementación mediante algoritmos en las aplicaciones informáticas de teledetección son muy variados (*Pérez y Muñoz, 2006*).

La corrección geométrica de las imágenes satélite puede abordarse de acuerdo a tres procedimientos. En el primero, denominado corrección orbital, se pretende modelar aquellas fuentes de error geométrico conocidas, a partir de aplicar transformaciones inversas a las que realiza el sensor en el momento de la adquisición. Para ello, es preciso disponer, con bastante precisión, de las características orbitales de la plataforma y de las especificaciones del sensor. Gracias a ellas se pueden corregir errores sistemáticos, como son los derivados de la rotación o curvatura terrestre y de la inclinación de la órbita.

El segundo enfoque resulta más empírico. Se trata de modelar el error geométrico a partir de una serie de puntos de coordenadas conocidas, que se denominan puntos de control, en este caso el error se modela inductivamente, ya que en las funciones de transformación se incluyen simultáneamente todas las fuentes de error, asumiendo como es lógico, que esos puntos sean suficientemente representativos de la deformación geométrica que tiene la imagen.

El tercero es la ortorectificación o también llamada ortocorrección de imágenes que corrige el desplazamiento mediante el uso del modelo de elevación digital (DEM).

4. Imágenes satelitales en estudios del arroz

Las imágenes de satélite se han utilizado como fuentes de datos en diversos proyectos agrícolas donde el arroz (*Oryza sativa* L.) es un componente importante. Xiao *et al.* (2006) utilizaron imágenes del sensor MODIS para detectar cambios y evaluar la expansión de los cultivos de arroz bajo riego en 13 países de Asia, y encontraron que a escala nacional hubo alta correlación con los datos de las estadísticas oficiales y menores correlaciones al nivel subnacional.

También se emplearon para evaluar el aumento de áreas cultivadas en arroz mediante análisis de series de tiempo en Vietnam (Sakamoto, 2009). Las imágenes Landsat se utilizaron para identificar cultivos de arroz y estimar áreas en el Japón, donde se presentó confusión con algunos algoritmos en algunos sitios, mientras que los índices entre las bandas 4 y 5 permitieron una buena discriminación de los cultivos de arroz (Ishiguro *et al.*, 1993); igualmente en China se han utilizado imágenes Landsat con el apoyo de otros datos para estudiar el desarrollo agrícola (Welch y Pannell, 1982).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el área de producción arrocera conocida como Guaro, ubicado en el agroecosistema Mayarí en la provincia de Holguín. Se utilizó un diseño de muestreo completamente aleatorizado con la elaboración de una grilla de 50 metros de espaciado entre puntos proyectados en el sistema WGS84 /UTM zona 18 N (Figura 1).

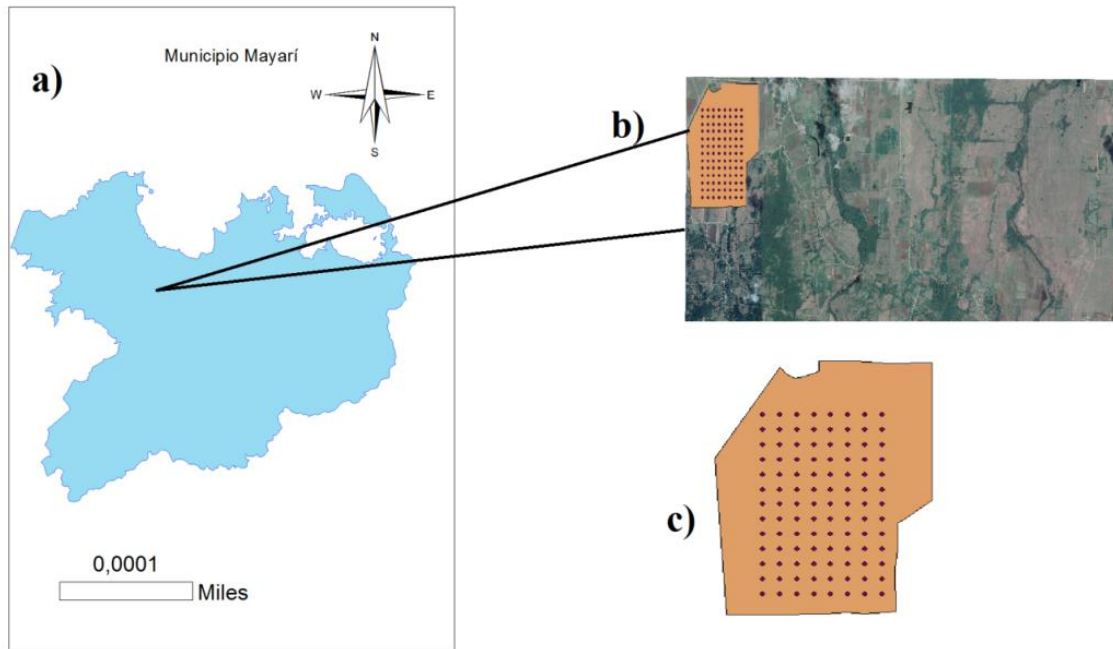


Figura 1. Agroecosistema Mayarí (a), imagen del SAS Planet del área de producción arrocera Guaro (b) y Grilla de puntos (c).

La imagen utilizada (*LC08_L1TP_011046_20181219_20181227_01_T1*) para la extracción de la información espectral proviene del satélite comercial Landsat 8 OLI/TIRS, descargada del sitio www.usgs.com del Servicio Geológico de los Estados Unidos.

El satélite utilizado tiene las siguientes características (Tabla 1). Para la fecha de adquisición de las imágenes multiespectrales se encontraba sembrada de arroz el área de estudio y el promedio de lluvias precipitadas hasta ese mes fue 79.0 mm y 26.6 °C de temperatura.

Tabla 1. Características del sensor Landsat 8 OLI/TIRS según (U.S. Geological Survey, 2016).

Bandas	Color de la banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (metros)
1	aerosol costero	0.433 - 0.453	30
2	azul	0.450 – 0.515	30
3	verde	0.525 – 0.600	30
4	rojo	0.630 – 0.680	30
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.845 – 0.885	30
6	Infrarrojo de onda corta(SWIR1)	1.560 – 1.660	30
7	Infrarrojo de onda corta(SWIR2)	2.100 – 2.300	30
8	Pancromático	0.500 – 0.680	15
9	cirrus	1.360 – 1.390	30
10	Infrarrojo térmico (TIRS1)	10.30 – 11.30	100
11	Infrarrojo térmico (TIRS2)	11.50 – 12.50	100

A la imagen se le realizó la corrección radiométrica para la eliminación de los efectos causados por factores atmosféricos en el software QGis versión 3.10 A Coruña. Los índices espectrales utilizados para la estimación de la conductividad eléctrica se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Índices espectrales determinados para la estimación de la conductividad eléctrica del suelo.

Índices espectrales de salinidad	Referencias
$NDSI = (B4 - B5)/(B4 + B5)$	Khan <i>et al.</i> (2001)
$SI = SWIR1/SWIR2$	Khan <i>et al.</i> (2001)
$SI.ASTER = (B4 - B3)/(B4 + B5)$	Al-Khaier (2003)
$SSSI1 = B9 - B10$	Bannari <i>et al.</i> (2008)
$SSSI.2 = (B9 * B10 - B10 * B10)/B9$	Bannari <i>et al.</i> (2008)

Luego del procesamiento digital de la imagen resultante de la determinación de los índices espectrales de salinidad se predijo el índice salino semiempírico de la conductividad eléctrica del suelo a través de modelos matemáticos planteados por (Bannari *et al.*, 2008) los cuales se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Modelos matemáticos para el cálculo del índice semiempírico de la conductividad eléctrica e índices espectrales para la determinación de la conductividad eléctrica a partir de información espectral.

Índices espectrales de salinidad	Modelos matemático para estimar la CE
<i>NDSI</i>	$CE = 627.45x^2 + 147.16x + 9.71$
<i>SI</i>	$CE = 1082.80x^2 - 2202x + 1121$
<i>SI.ASTER</i>	$CE = 5643x^2 - 117.91x + 2.18$
<i>SSSI.1</i>	$CE = 3212x^2 + 132.20x + 0.397$
<i>SSSI.2</i>	$CE = 4521x^2 + 124.5x + 0.407$

Para la clasificación de la salinidad del suelo se usó la propuesta por Taylor (1993), la misma presenta una escala que adopta clases de salinidad adaptadas para modelos predictivos de la conductividad eléctrica con valores entre 0 % y 100 % dS. m⁻¹ respectivamente.

El análisis estadístico se realizó en el software *Statgraphics Plus* versión 5.1 en el cual se efectuó el análisis de regresión lineal de la información espectral y los valores estimados de conductividad eléctrica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se presenta el análisis de regresión lineal de los índices espectrales vs conductividad eléctrica estimada mediante los modelos matemáticos semiempíricos. En la misma se puede apreciar que tanto los índices espectrales utilizados como los modelos matemáticos, SI vs CE y SI.ASTER vs CE sobreestiman el contenido de sales en el suelo y heterogeneidad en los valores estimados dado por el uso de diferentes bandas espectrales para su determinación.

Elhag (2016) refiere que los valores del índice espectral que indica el estado de la salinidad del suelo oscila desde -1 (presencia alta de sales) a 1 (baja presencia de sales en el suelo).

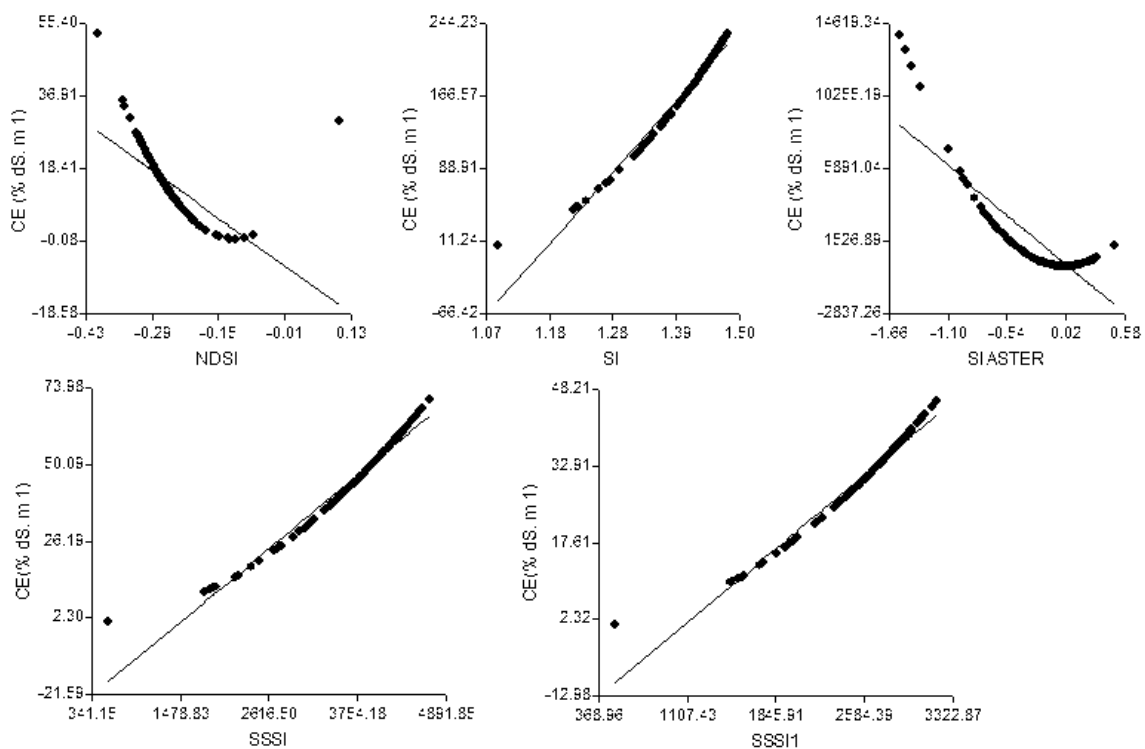


Figura 2. Análisis de regresión lineal de los índices espectrales vs. conductividad eléctrica estimada mediante modelos matemáticos semiempíricos.

La utilización de modelos lineales para determinar el error en la determinación de la salinidad por teledetección es muy utilizado al reducir las interferencias provocada por la variación espacial y temporal de las sales en el suelo (Scudiero *et al.*, 2015).

Estudios realizados por *Ma et al.* (2017) y *Bannari et al.* (2008; 2016), validaron la utilización de modelos lineales para la estimación de la conductividad eléctrica a partir de información espectral de índices salinos calculados a partir de imágenes del satélite Landsat 8 OLI/TIRS.

En la literatura referente al uso de sensores remotos para la determinación de índices salinos proponen diversos métodos para su cálculo. *Khan et al.* (2001) en su investigación propone el uso de las bandas 3 y 4 del sensor LISS-II y IRS-1B mediante los índices de ajuste del brillo del suelo (BI), el NDSI y el IS.

Por otra parte *Al-Khaier* (2003) determinó mediante el NDSI diferentes clases salinas en el suelo en una zona semiárida con las bandas 4 y 5 del sensor ASTER.

En el estudio realizado por *Mashimbye* (2013) para la determinación de la conductividad eléctrica en laboratorio refirió que la mejor forma de detectar la salinidad y la sodicidad del suelo mediante sensores remotos es con el uso de las bandas relacionadas con el infrarrojo de onda corta (SWIR1).

Otras investigaciones han dirigido su estudio en diferentes tipos de suelos y con niveles de salinidad, en el cual utilizan las bandas roja e infrarroja cercana para el análisis de la vegetación y los tipos de sales en el suelo (*Howari et al.*, 2002).

Tabla 4. Información estadística del análisis de regresión lineal entre los índices espectrales y la conductividad eléctrica estimada a partir de modelos matemáticos semiempíricos.

Índice	Coeficiente	Coeficie	Error	Error	Durbi	Ecuación del
--------	-------------	----------	-------	-------	-------	--------------

espectr al vs CE	de determinaci ón	nte de correlaci ón	estándar	Medio Absolu to	n- Wats on	modelo
NDSI vs CE	73,5168	-0,6596	6,5097	3,8087	0,067 5	CE = -7,5038 - 86,8489*NDSI
SI vs CE	97,3034	0,9864	8,5195	5,8261	0,051 8	CE = -820,9512 + 705,5234*SI
SI.AST ER vs CE	73,6875	-0,8584	1351,78 02	981,03 84	0,024 2	CE = 210,0047 - 5286,91*SI.AS TER
SSSI.1 vs CE	96,9478	0,9846	2,7584	1,9690	0,020 6	CE = -28,4225 + 0,0201*SSSI.1
SSSI.2 vs CE	97,2118	0,98596	1,5671	1,0441	0,041 8	CE = -20,3179 + 0,0199*SSSI.2

La Tabla 4 presenta la información estadística del análisis de regresión lineal entre los índices espectrales y conductividad eléctrica estimada. El modelo NDSI vs Ce

presentó el menor coeficiente de determinación con un 73,5168 % y correlación negativa de -0,6596 al igual que el modelo SI.ASTER vs CE con -0,8584 lo cual deduce que a medida que este índice alcanza valores positivos disminuyen los valores estimados de conductividad eléctrica. Los modelos restantes presentaron una alta determinación y coeficiente de correlación cercanos al 100 %.

En una investigación realizada por Bannari *et al.* (2016) obtuvo con el uso de los modelos semiempíricos y los índices NDSI e IS coeficientes de determinación de un 70,0 % y un 67,0 % respectivamente.

Zhang *et al.* (2015) con el uso de imágenes del satélite Landsat 8, realizaron el cálculo del NDVI en áreas salinas de la Rivera del Delta para la extracción de información del estado de la salinidad del suelo mediante modelos matemáticos utilizando para su validación el coeficiente Kappa para el cual tuvieron un valor de 70,17 % en su determinación.

Nouri *et al.* (2018) determinaron la salinidad del suelo en Australia mediante el uso de 45 índices espectrales, en los que obtuvieron modelos con una alta significación en su comparación y sugieren el uso del índice EM 38 (*Land Surface Water Index*, LSWI) para la validación de la información espectral y las condiciones de salinidad.

Zewdu *et al.* (2015) plantearon un estudio de la salinidad en Etiopia, donde utilizaron valores de conductividad eléctrica y del índice NDSI para la obtención de un modelo que exprese el estado de la problemática existente en áreas irrigadas de este país, con 67.3% de correlación.

Basado en la clasificación planteada por Taylor (1993) se aprecia diferencias entre los valores medios estimados de conductividad eléctrica (Figura 3). De acuerdo a este autor los índices NDSI y SSSI.2 muestran una salinidad moderada ($20\% < EC \leq 40\%$) mientras que el uso del SI-ASTER y SSSI.1 producen una sobreestimación con valores superiores al 100 % y evidencia un área con condiciones extremas de salinidad ($EC \geq 100\%$).

Según El-Battay *et al.* (2017) indica la potencialidad de los índices NDSI, SI E SI-ASTER para la estimación de la conductividad eléctrica del suelo en agroecosistemas áridos, y refiere que el SSSI.1 realizó una sobreestimación con valores promedios de 145,24 %; el cual causa confusión cuando se trata de una investigación de este tipo.

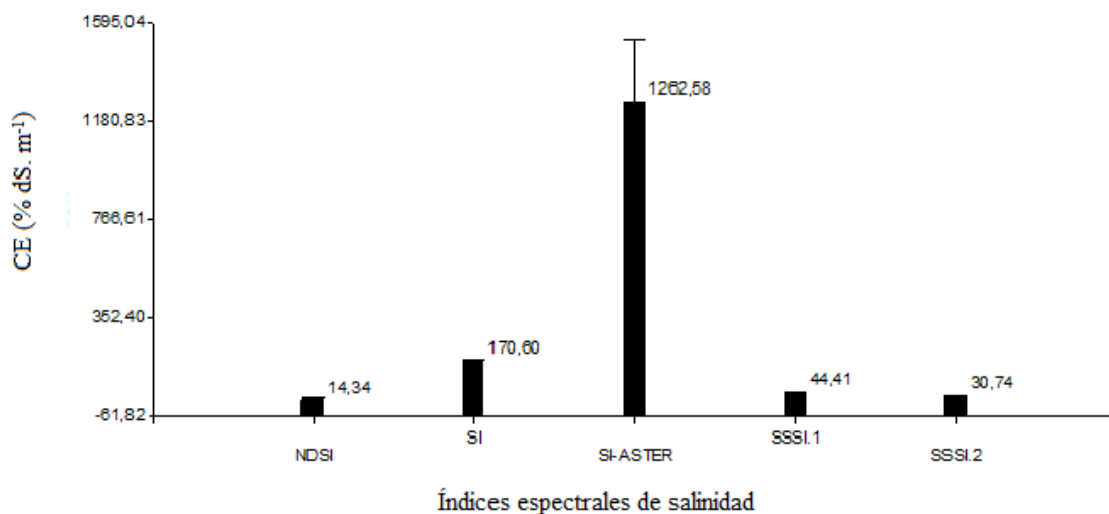


Figura 3. Representación gráfica de los valores medio estimados de conductividad eléctrica mediante los índices espectrales calculados.

Estudios realizados por Meng *et al.* (2009) extrajeron información de la degradación de la salinidad del suelo mediante análisis espectral en diferentes usos de la tierra afectada por la salinidad provocada por extensos procesos de sequía, para lo cual construyeron un índice que refleja la degradación por salinidad en el área de estudio.

Zhang *et al.* (2015) refieren la utilización de una clasificación de la salinidad obtenida mediante modelos matemáticos de índices espectrales de vegetación y la humedad del suelo, expresada de siguiente forma: para valores de bajo nivel de salinidad ($SSSI < 0.355$), salinidad moderada ($0.355 < SSSI < 0.418$), salinidad severa en el suelo, ($0.418 < SSSI < 0.459$) y suelo salino ($SSSI > 0.459$).

De acuerdo con los valores del índice de vegetación NDVI, para determinar la salinidad del suelo; refiere (Zhang *et al.*, 2015) que valores de (NDVI > 0.815) es baja la salinidad, moderada ($0.762 < \text{NDVI} < 0.815$), severa ($0.739 < \text{NDVI} < 0.762$) y suelo salino ($\text{NDVI} < 0.739$).

CONCLUSIONES

- La determinación de la conductividad eléctrica mediante la utilización de la información espectral es un indicador de esta propiedad en las condiciones de suelo y cultivo del arroz estudiada.
- Aunque la utilización de los índices espectrales de salinidad arrojó una alta determinación, el SI y el SI-ASTER indicaron un sobreestimación de la conductividad eléctrica existente en el suelo lo cual podría estar dado por la presencia de una saturación de la señal captada por el sensor y reflejada en los índices obtenidos, la cual sobrepasó los valores en los cuales oscila el índice salino.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI SOLANGI, KASHIF.; ALI SIYAL, ALTAF.; WU, YANYOU.; ABBASI, BILAWAL.; SOLANGI, FARHEEN.; ALI LAKHIAR, IMRAN AND ZHOU, GUIYAO.: "An assessment of the spatial and temporal distribution of Soil Salinity in combination with field and satellite data: A case study in Sujawal District", *Journal Agronomy*, 9(869): 1-12, 2019, Doi:10.3390/agronomy9120869.

AL-KHAIER, F.: "Soil salinity detection using satellite remotes sensing". Master's thesis, International institute for Geoinformation science and earth observation, Enschede, The Netherlands. 61p, 2003.

ALLBED, A.; KUMAR, L.; ALDAKHEEL, Y.Y.: "Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated región", *Geoderma*, 230, 1-8, 2014, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.025>

AYERS, R.S.; WESCOT, D.W.: "Water quality for agricultura". Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, FAO Irrigation and Drainage Paper 29, 1985.

BALAKRISHNAN, P.; SALEEM, A.; MALLIKARJUN, N.D.: "Groundwater Quality Mapping using Geographic Information System (GIS): A case study of Gulbarga City, Karnataka, India", *African Journal of Environmental Science and Technology*, 5(12): 1069-1084, 2011, DOI: [10.5897/AJEST11.134](https://doi.org/10.5897/AJEST11.134)

BANNARI, A.; GUÉDON, A.M.; EL-GHMARI, A.: "Mapping Slight and Moderate Saline Soils in Irrigated Agricultural Land Using Advanced Land Imager Sensor (EO-1) Data and Semi-Empirical Models", *Communications in Soil Science and Plant Analysis Journal*, 47, 1883-1906, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1206919>

BANNARI, A.; GUEDON, A.M.; EL-HARTI, A.; CHERKAOUI, F.Z.; EL-GHMARI, A.: "Characterization of Slight and Moderate Saline and Sodic Soils in

Irrigated Agricultural Land Using Simulated Data of ALI (EO-1) Sensor”, *Communications in Soil Science and Plant Analysis Journal*, 39, 2795-2811, 2008, DOI: <https://doi.org/10.1080/00103620802432717>

Barzola, J. (2012). *Producción de arroz bajo riego de la variedad F-50 mediante el uso de briquetas compuestas de NPK en el cantón Daule*. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al Título de Ingeniero Agropecuario. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción.

Benavides, A., y Homero, R. (2002). *Respuestas de las plantas a la radiación electromagnética*. Saltillo, México: Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Borengasser, M., Hungate W. S., and Watkins (2008), *Hyperspectral Remote Sensing Principles and Applications*, CRC Press Taylor & Francis Group- Boca Raton London New York, pp. 119.

Cabello, A., J.L., G. V., y C.F., K. (2004). *Desarrollo de un método para caracterizar la reflectancia de superficies no lambertianas*. Argentina: Anales de la Asociación Física Argentina, 15, pp. 102- 110

Casas,R.R.y M.S. Rossi. 2011. Manejo de campos salinos. Ciencia y tecnología. Supercampo. Año XVII, N° 196

CHANG, T.T. 1983. The Origins and Early Cultures of the Cereal Grains and Food Legumes. En: KEIGHTLEY, D.N. (Ed.) *The Origins of Chinese Civilization*. Berkeley, CA, USA, University of California Press. pp. 65-94.

CIAT. (2010). *El arroz y su medio ambiente*. Cali, Colombia, Producción Eco-Eficiente del Arroz en América Latina, pp. 83-97

DE AVILA, L.A.; MARTINI, L.F.; MEZZOMO, R.F.; REFATTI, J.P.; CAMPOS, R.; CEZIMBRA, D.M.; MACHADO, S.L.O.; MASSEY, J.H.; CARLESSO, R.;

- MARCHESAN, .: "Rice water use efficiency and yield under continuous and intermittent irrigation", *Agronomy Journal*, 107(2): 442-448, 2015, DOI: 10.2134/agronj14.0080.
- DE DATTA, S.K.; GOMEZ, K.A. & DE SCALSOTA, J.P. 1988. Changes in Yield Response to Major Nutrients and in Soil Fertilizer under Intensive Rice Cropping. *Soil Science*. 146(5): 350-358.
- De la Cruz, J. (2008). *Reflectancia e índices espectrales en pimiento para el diagnóstico nutrimental de nitrógeno*. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el grado de Maestro en Ciencias. Texcoco, México: Colegio de Postgraduados, Institución de enseñanza e investigación en Ciencias Agrícolas.
- DELGADO, C.: "Influencia de las condiciones agrometeorológicas sobre la producción arrocera en Cuba. ", En: *III Congreso de Meteorología Tropical Tema: La Agrometeorología en los Trópicos*, pp. 518-551, Palacio de las Convenciones de La Habana, Cuba., 2012.
- DING, J.; YU, D.: "Monitoring and evaluating spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the Werigan-Kuqa Oasis, China, using remote sensing and electromagnetic induction instruments", *Geoderma*, 235-236(4), 316-322, 2014, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.028>.
- EL-BATTAY, A.; BANNARI, A.; HAMEID, N. A.; ABAHUSSAIN, A.A.: "Comparative study among different semi-empirical models for soil salinity prediction in an arid environment using OLI Landsat-8 data", *Advances in Remote Sensing*, 6: 23-39, 2017, DOI: 10.4236/ars.2017.61002.
- ELHAG, M.: "Evaluation of Different Soil Salinity Mapping Using Remote Sensing Techniques in Arid Ecosystems, Saudi Arabia", *Journal of Sensors*, 96175-96175, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/7596175>.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 2004. Historia do Arroz. *Embrapa Unidade Arroz e Feijão*. Disponible on-line en: <http://www.cnpaf.embrapa.br/>
- Enoki, A., Castillo, E., y Merlet, H. (1999). *Sistema para el Seguimiento y Análisis de Tierras mediante Teledetección (TeleSat) Bases Teóricas*.
- FAO. (2015). *americas/noticias/ Erosión, pérdida de carbono orgánico y salinización son las principales amenazas a los suelos de América Latina y el Caribe* . Obtenido de Organización para las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura : <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/360627/>
- Fernández, I., Rodríguez, M., López, J., & Vela, G. (2014). *Dinámica de la salinidad de los suelos*. Obtenido de Universidad Autonoma Metropolitana: http://cbs1.xoc.uam.mx/e_bios/docs/2014/05_SALINIDAD_EN_SUELOS_ESPANOL.pdf
- FERNANDO, GERÓNIMO.: “*Suelos salinos y sódicos*”, Cátedra de Edafología, Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, 2019, pp 1-8.
- Giron, Y., Oleschko , K., Francois , P., Hernández , M., Camarillo , E., & Velazqués , J. (2009). *Análisis fractal de la reflectancia de los suelos salinos*. Obtenido de Scielo: <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v43n4/v43n4a7.pdf>
- HARTI, A.E.; LHISSOU, R.; CHOKMANI, K.; OUZEMOU, J.; HASSOUNA, M.; BACHAOUI, E.M.; GHMARI, A.E.: “Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using satellite spectral indices”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 50, 64-73, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.03.008>.

- Hernández, J., Escobar, I., y Nicolás, C. (2001). *Luz solar en invernaderos mediterráneos*. Granada, España: Caja Rural de Granada.
- HOWARI, F. M.; GOODELL, P. C.; MIYAMOTO, S.: "Spectral properties of salt crusts formed on saline soils", *Journal of Environmental Quality*, 31:1453-61, 2002, DOI:10.2134/jeq2002.1453.
- INIAP. (2007). *Origen y Distribución del Arroz*. Quevedo, Ecuador: Estación Experimental Tropical Pichilingue, Manual del Cultivo de Arroz (66).
- Ishiguro, E., M.K. Kumar, Y. Hidaka, S. Yoshida, M. Sato, M. Miyazato y J.Y. Chen. 1993. Use of rice response characteristics in area estimation by LANDSAT/TM and MOS-1 satellites. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 48(1), 26-32.
- JULIANO, B.O. 1993. Rice in Human Nutrition. Preparado en Colaboración FAO Biochemistry Unit. Plant Breeding, Genetics and Biochemistry Division and International Rice Research Institute. Published with the Collaboration of the International Rice Research Institute - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- KHAN, N. M.; RASTOSKUEV, V.; SHALINA, E.; SATO, Y.: "Mapping salt-affected soils using remote sensing indicators a simple approach with the use of GIS IDRISI". Proceedings of the 22nd Asian Conference on Remote Sensing, Center for Remote Imaging, sensing and Processing (CRISP), National University of Singapore; Singapore Institute of Surveyors and Valuers"; Asian association on remote sensing, Singapore, 5 p, 2001.
- KUMAR, N.; SINGH, S.K.; PANDEY, H.K.: "Drainage morphometric analysis using open access earth observation datasets in a drought-affected part of Bundelkhand, India", *Applied Geomatics*, 10: 173-189, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0218-2>.

- Lu, J.J. y Chang, T.T. 1980. Rice in its Temporal and Spatial Perspective. En LUH, B.S. (Ed.) *Rice. Production and Utilization*. AVI Publishing Co. Westport. CT. USA. pp. 1-74.
- MA, Z.Q.; SHI, Z.; ZHOU, Y.; XU, J.F.; YU, W.; YANG, Y.Y.: "A spatial data mining algorithm for downscaling TMPA 3B43 V7 data over the Qinghai-Tibet Plateau with the effect of systematic anomalies removed", *Remote Sensing of Environment*, 200: 378-395, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.023>.
- MASHIMBYE, Z. E.: "Remote sensing of salt-affected soil. Ph.D. Thesis, Faculty of AgriSciences, Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa, 151 p, 2013.
- McCloy, K.R. 1995. Resource management information systems process and practice. Taylor y Francis, London.
- Meng, Y., Zhao, G.-X. and Wang, J. (2009) Remote Sensing Image-Based Information Extraction for Land Salinized Degradation and Its Evolution in Kenli County. *Areal Research and Development*, 28, 135-139.
- Narváez , H., Combatt, E., & Bustamante , I. (Diciembre de 2014). *Distribución espacial de la salinidad en suelos del área de influencia de la desembocadura del río Sinú*.
Obtenido de Scielo : <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v17n2/v17n2a14.pdf>
- Nouri, Hamideh.; Chavoshi, Sattar.; Alaghmand, Sina.; Sharolyn, J. Anderson, Paul.; Parvazian, Somayeh.; Beecham, Simon.: "Soil salinity mapping of urban greenery using remote sensing and proximal sensing techniques; the case of Veale Gardens within the Adelaide Parklands", *Sustainability*, 10(2826): 1-14, 2018, doi:10.3390/su10082826.

- Pérez, C., & Muñoz, Á. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca
- Pérez, G. C. y A. L. Muñoz N. (2006), *Teledetección Nociones y Aplicaciones*, Copyrighted Material- España, pp. 359.
- PNUD: *Informe sobre Desarrollo Humano*, Inst. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Colombia, 2016.
- Ponvert Delisles, Dámaso R.; Kelly, F. Samuel; Reyes, I. Las técnicas geomáticas aplicadas en la agricultura: El catastro agrícola *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 21, núm. 4, octubre-diciembre, 2012, pp. 84-92 ISSN: 1010-2760
- PUJOL, ROMÁN.; HERRERA, JULIÁN.; CID, GRECO.; ALARCÓN, ROBERTO.; LÓPEZ, GILBERTO.: "Evaluación del funcionamiento hidráulico del drenaje soterrado en áreas arroceras de la zona norte de la provincia Granma, Cuba", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(3): 30-34, 2009, ISSN: 1010-2760.
- Queiroz, J. E., Goncalves, A. C., Souto, J. S., & Folegatti, M. V. (2010). Manejo da salinidade na agricultura.
- Quirós, M. (2013). *Firmas espectrales*. GEOMÁTICA. disponible en URL: http://geomaticaal-dia.blogspot.com/2013/04/firmas-espectrales_2.html
- REDDY K.R.; D'ANGELO, E.M. & HARRIS, W.G. 2000. Biogeochemistry of wetlands. En: SUMMER M. E. (Ed.) *Handbook of Soil Science*. CRC Press New York. pp: G-89-118.
- REYES, D.: "Del arroz en barco al arroz que cultivamos", *Periódico Granma-Cuba*, de enero de de 2019, ISSN: 0864-0424.
- Richard, J. A.; Jia X. (2006), *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 4th Edition, pp. 46-50.

RIVERO-VEGA, R.E.; RIVERO-JASPE, Z.I.; RIVERO-JASPE, R.R.: “Impactos de una fluctuación climática sobre el arroz, maíz y soya en Camagüey – Sancti Spiritus”, [en línea] *Revista Cubana de Meteorología*, ISSN-2664-0880, 24(1): 44-60, 29 de enero de 2018. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/259> [Consulta: 27 de enero de 2020].

ROMÁN, J.; GARCÍA, F.; MORALES, O.; HERNÁNDEZ, R.: “Determinación del método de preparación de suelo y siembra para el cultivo del arroz en suelos afectados por salinidad y sodicidad en áreas del CAI Arrocero de Holguín”, *Revista Electrónica Granma Ciencia*, 10(3), 2006, ISSN 1027-975X.

Sakamoto, T., C. Van Phung, A. Kotera, K. Duy Nguyen y M. Yokozawa. 2009. Analysis of rapid expansion of inland aquaculture and triple rice-cropping areas in a coastal area of the Vietnamese Mekong Delta using MODIS time-series imagery. *Landscape Urban Plan.* 92(15), 34-46.

SCUDIERO, E.; SKAGGS, T.H.; CORWIN, D.L.: “Regional-scale soil salinity assessment using Landsat ETM plus canopy reflectance”, *Remote Sensing of Environment*, 169: 335-343, 2015, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.0260034>.

SIDIKE, A.; ZHAO, S.; WEN, Y.: “Estimating soil salinity in Pingluo County of China using QuickBird data and soil reflectance spectra”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26: 156-175, 2014, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.06.002>.

Sobrino, J. A. (2000), *Teledetección*, Servicio de publicaciones, Universidad de Valencia (ISBN 84-370-4220-8), Valencia (España), pp. 78-81.

Sobrino, J. A. (2001). *Teledetección*. Valencia, España: Guada Impresiones.

Stoner, E., & Baumgardner, M. (1981). *Characteristics Variations in Reflectance of surface Soils*. Madison. US: Soil Science Society of America, 45(6), pp. 1161-1165 .

TAYLOR, S.: “*Dryland salinity: introductory extension notes*”. Department of Land and Water Conservation, Sydney, 63 p, 1993, ISBN: 9780731011247.

UNITED STATE OF GEOLOGICAL SURVEY.: “*Landsat Earth observation satellites: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2015–3081*”, 4 p, 2016, DOI: <https://doi.org/10.3133/fs20153081>.

Vermote E., D. Tanré, J. L. Deuzé, M. Herman, J. J. Morcrette, and S. Y. Kotchenova (2006), Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum - Vector (6SV), *6S User Guide Version 3*, part 1, pp. 1-55.

Welch, R. y C.W. Pannell. 1982. Mapping recent agricultural developments in China from satellite data. *Adv. Space Res.* 2(8), 111-125.

Xiao, X., S. Boles, S. Frolking, C. Li, J.Y. Babu, W. Salas y B. Moore. 2006. Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images. *Remote Sens. Environ.* 100(15), 95-113.

ZAMAN, M.; SHAHID, S.A.; HENG, L.: “*Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*”, Springer: New York, NY, USA, 3: 43-53, 2018, ISBN 978-3-319-96190-3.

Zhang, T.R., Zhao, G.X., Chang, C.Y., Wang, Z.R., Li, P., An, D.Y. and Jia, J.C. (2015) Information Extraction Method of Soil Salinity in Typical Areas of the Yellow River Delta Based on Landsat Imagery. *Agricultural Sciences*, 6, 71-77. <http://dx.doi.org/10.4236/as.2015.61006>.