

# In-Field Electronic Based System and Methodology for Precision Agriculture and Yield Prediction in Seasonal Maize Field

C. Martinez-Felix, G. Vazquez-Becerra, *Member, IEEE*, J. Millan-Almaraz, *Member, IEEE*, F. Geremia-Nievinski, J. Gaxiola-Camacho, and A. Melgarejo-Morales

**Abstract**—The present research work consisted in the development of an electronic prototype capable of collecting information of the maize crop field. Specifically, this electronic device is able of record relative humidity, ambient temperature and geographic coordinates; such as latitude and longitude. This, through a communication protocol established via Bluetooth using a smartphone with Android as operating system to receive and save information. The use of the proposed electronic prototype allows the farmer to obtain accurate and georeferenced information of interest points in its crop field for further decisions. Finally, the combination of in-situ data obtained by the electronic prototype with LandSat 8 satellite imagery with spatial resolution of 30 meters allow the determination and creation of a yield map based on remote sensing techniques using vegetation indices such as NDVI, WDRVI and CVI with the aim of contribute to the farmer decisions in future maize planting seasons.

**Index Terms**— Bluetooth, GIS, GPS, Maize, Remote Sensing.

## I. INTRODUCCIÓN

EL conocimiento técnico sobre la agricultura de precisión brinda a los agricultores la oportunidad de controlar y monitorear sus tierras, reduciendo las horas de trabajo y brindando información sobre la salud del cultivo, lo que permite un uso adecuado de los recursos y una mayor productividad, entre otros hechos importantes.

Los autores agradecen al Laboratorio Electrónico de la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas y a la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio de la Universidad Autónoma de Sinaloa por poner a disposición el equipo necesario para el prototipo desarrollado. Esta investigación fue financiada por una beca (418045) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Carlos A. Martínez Félix, is with the Earth and Space Science Department, Universidad Autónoma de Sinaloa, 80020 Mexico, (e-mail: carlosmartinez@uas.edu.mx).

G. Esteban Vazquez B., is with the Earth and Space Science Department, Universidad Autónoma de Sinaloa, 80020 Mexico, (e-mail: gvazquez@uas.edu.mx).

Jesus Roberto Millan Almaraz, is with the Physics-Mathematics Science Department, Universidad Autónoma de Sinaloa, 80020 Mexico, (e-mail: jr.millan.almaraz@gmail.com).

Felipe Geremia Nievinski, is with the Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 90650-001, RS, Brasil. (e-mail: fgnievinski@gmail.com)

J. Ramon Gaxiola Camacho, is with the Civil Engineering Department, Universidad Autónoma de Sinaloa, 80020 Mexico, (e-mail: jrgaxiola@uas.edu.mx).

Angela Melgarejo Morales, is with the Earth and Space Science Department, Universidad Autónoma de Sinaloa, 80020 Mexico, (e-mail: angelamelgarejo@uas.edu.mx).

Sin embargo, la aplicación de la agricultura de precisión requiere de grandes inversiones que no todos los agricultores pueden permitirse, especialmente aquellos que pertenecen a países donde esta tecnología es relativamente nueva y está en proceso de desarrollo, generando cierta dependencia a las tecnologías extranjeras; mismas que no siempre están disponibles. Además, ciertos recursos agrícolas, tales como: químicos, fertilizantes, soluciones para el control de plagas y semillas, por mencionar algunos, son escasos, y debido a la alta demanda, sus precios están en constante aumento, afectando el precio final del producto, los hechos anteriores hacen que la gestión adecuada de los recursos agrícolas sea de vital importancia.

El uso descuidado de fertilizantes o productos químicos genera contaminación por nitratos en la tierra [1], afectando su fertilidad y dejando grandes hectáreas inutilizables para la agricultura. Además, dichos fertilizantes y productos químicos contaminan las aguas subterráneas al producir lixiviación de nitratos. Para corregir lo anterior, se requieren tratamientos costosos y de largo plazo para recuperar el estado óptimo del suelo y así reutilizar el mismo para la siembra de productos. Por lo tanto, el desconocimiento y el no acceso a los beneficios de la agricultura de precisión genera desventajas que resultan en cosechas pobres y desperdicio de tierra debido al mal uso de los recursos agrícolas.

Existen varias tecnologías que se pueden aplicar al campo de la agricultura; un ejemplo de esto es la percepción remota. Con la aplicación de percepción remota [2,3] es posible monitorear el cambio en la salud o el vigor vegetal del cultivo [4]. Esto le permite al agricultor obtener la información necesaria para tomar decisiones en etapas críticas de crecimiento, contribuyendo al desarrollo saludable del cultivo y, en consecuencia, las probabilidades de obtener un alto rendimiento al final de la temporada incrementan. Además, la percepción remota en conjunto con la aplicación de otras tecnologías capaces de obtener información sobre el cultivo [5,6] contribuye al desarrollo de la agricultura de precisión. Sus beneficios potenciales se han demostrado en otros países y cultivos [7, 8, 9, 10], lo que lleva a los agricultores a optar por estas nuevas tecnologías para optimizar los procesos de siembra y cosecha de sus productos, reduciendo los costos y al mismo tiempo aumentando la calidad y productividad [11, 12]. Sin embargo, con base en la literatura existente [13,14] se encontró que existen pocas metodologías que combinen

técnicas de percepción remota, dispositivos electrónicos genéricos y teléfonos inteligentes para monitorear y predecir el rendimiento de un cultivo al final de su ciclo.

Con el fin de encontrar una solución a la problemática anterior, el presente trabajo de investigación propone el desarrollo de un prototipo electrónico basado en tecnología Bluetooth, un sistema de posicionamiento (GPS) y un sensor de temperatura y humedad que permite la recolección y transferencia de información con un dispositivo móvil (Smartphone) mediante una aplicación para Android. Por consecuencia, utilizando técnicas de percepción remota, se calcularon tres índices de vegetación distintos (NDVI, WDRVI y CVI) utilizando imágenes con una resolución espacial de treinta metros y una resolución temporal de dieciséis días del área de estudio, tomadas desde la plataforma satelital Landsat 8. Dicha plataforma tiene suficiente resolución espectral para generar los índices de vegetación propuestos.

Finalmente, con el prototipo electrónico propuesto, la información recolectada y el análisis de percepción remota se creó un mapa de rendimiento que sirva de soporte para tomar decisiones relacionadas con la salud y el desarrollo del cultivo a un costo menor en comparación con una tecnología similar, tal es el caso del Trimble® Green Seeker® [15]. Dicho dispositivo requiere de capacitación especial y presenta limitaciones debido a su sensor activo que emite luz en la banda roja e infrarroja del espectro electromagnético. Por lo tanto, su resolución espectral resulta limitante en términos de cálculo de índices de vegetación, trabajando solo con el NDVI.

Finalmente, el aporte de este trabajo radica en que se utilizaron más índices de vegetación para realizar un análisis más sólido del estado de salud del cultivo [5, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22], además, una de las principales diferencias entre los resultados obtenidos durante esta investigación y los arrojados por dispositivos comerciales es la capacidad de trabajar con más bandas del espectro electromagnético para calcular un número mayor de índices de vegetación. Además, el prototipo electrónico propuesto puede actuar como una alternativa potencial para mejorar considerablemente el uso de fertilizantes nitrogenados, especialmente para el cultivo de maíz [22].

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la implementación de esta investigación, se aplicaron dos metodologías; la primera consistió en el diseño y desarrollo de un prototipo electrónico cuyo objetivo fue detectar la humedad y temperatura in-situ, así como obtener coordenadas geográficas entre los puntos de control seleccionados en el área de interés. La segunda metodología consistió en el procesamiento multispectral de imágenes satelitales de la plataforma Landsat 8 para el cálculo de múltiples índices de vegetación. Finalmente, la información obtenida por las dos metodologías descritas anteriormente se integró en un SIG, lo anterior para proporcionar una predicción del rendimiento del cultivo de maíz para la temporada otoño-invierno (Figura 1).



Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta en este trabajo de investigación.

### A. Área de Estudio

Como área de estudio, se seleccionó un campo de siembra y cosecha de maíz ubicado a 21 kilómetros de la ciudad de Culiacán, Sinaloa, México (Figura 2). Sus coordenadas geográficas son Latitud  $24^{\circ} 36' 35.53''$  N y Longitud  $107^{\circ} 29' 34.58''$  W. El área equivalente a 4.545 hectáreas cuenta con forma irregular y su suelo exhibe contaminación por salinidad, lo que dificulta su explotación agrícola debido a una zona de acuicultura cercana. Por lo tanto, es necesario aprovechar el área habilitada para la cosecha de maíz. Sin embargo, debido a que la siembra del maíz se presenta durante la temporada otoño-invierno el tipo de riego utilizado es mediante surcos, ya que se carece de lluvias para esta zona durante este periodo del año.

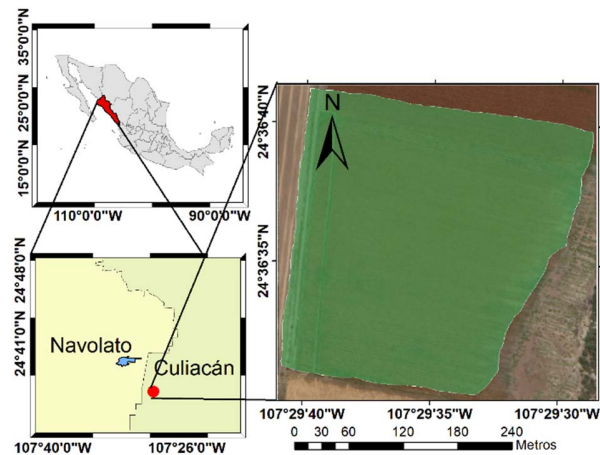


Fig. 2. Área de estudio propuesta para esta investigación.

El área de color verde, ilustrada en la Figura 2, indica la tierra habilitada para el cultivo del maíz (suelo adecuado para la siembra). La adquisición de datos de humedad y temperatura se desarrolló solo en dicha área y consistió utilizando el prototipo electrónico propuesto cubriendo toda el área de estudio realizando movimientos mediante un patrón de zigzag a una altura promedio de 1.70 m con respecto al nivel del suelo. La importancia de la recolección de datos radica en la mejora del rendimiento por uso de suelo y la aplicación de insumos de fertilizantes. Además, permitiendo al agricultor aplicar fácilmente tratamientos químicos a las áreas dañadas para recuperarlas y usarlas para el cultivo obteniendo mayores ingresos económicos. Sin embargo, las áreas inadecuadas son probablemente temporales; porque a medida que aumente el recurso económico, se aumentarán porciones de terreno hasta que pueda ocupar toda la tierra. Por lo tanto, los beneficios del mapa de rendimiento permitirán recuperar el área dañada a través del tiempo. Además, el mapa de rendimiento puede extenderse a tierras más grandes para aumentar los beneficios, ya que las tierras más grandes implican el uso de más

fertilizantes. Por lo tanto, disminuir el uso de fertilizantes implica reducir la contaminación química del suelo.

**B. Metodología del Prototipo**

El prototipo electrónico fue diseñado para comunicar y transferir datos a través de la tecnología Bluetooth [23,24] utilizando un teléfono inteligente con sistema operativo Android [25]. Además, el teléfono inteligente se utilizó para recibir y guardar información organizada en forma matricial en un archivo de texto, obteniendo datos precisos y georreferenciados de cada punto de interés en el campo de cultivo. Esto se realizó utilizando el microcontrolador Arduino UNO para facilitar el montaje de los componentes electrónicos. Para la medición ambiental de temperatura y humedad relativa, se utilizó un sensor digital modelo Sensirion SHT31, el cual tiene una resolución de 16 bits y una precisión de  $\pm 2\%$  para humedad relativa y  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  para temperatura en aire [26]. Se eligió este sensor debido a que viene calibrado de fábrica y por su comunicación digital I<sup>2</sup>C mediante la cual se facilita su conexión a cualquier microcontrolador. La transmisión de datos entre el prototipo electrónico y el teléfono inteligente fue posible gracias al uso de un módulo Bluetooth JY-MCU [27], mismo que funciona mediante comunicación en serie utilizando el protocolo UART, además, puede ser alimentado en un rango de voltaje de 3.6 a 6 volts, permitiendo una distancia máxima de comunicación de 15 metros. Para completar el prototipo electrónico, se utilizó un módulo GPS SKM-53 para obtener coordenadas geográficas de los puntos de interés (ver Figura 3A). Este módulo puede obtener una precisión promedio de 3 metros mientras que su consumo energético es de 45 mA con una alimentación de 3 volts. El módulo embebido cuenta con 14 pines digitales de entrada y salida, así como seis pines de entrada analógicos, mientras que su consumo promedio es de 46 mA con una alimentación de 5 volts (ver Figura 3B). Además, se desarrolló una aplicación móvil para Android utilizando la plataforma App Inventor 2 (ai2.appinventor.mit.edu/) cuyo objetivo es servir como interfaz de comunicación entre el teléfono inteligente y el prototipo. Con el objetivo de proteger el sistema de sensores del medio ambiente, este se instaló dentro de una caja termoplástica ABB con certificación de aislamiento IP55 (ver Figura 3). Así mismo, se fabricó en impresora 3D una estructura parabólica para evitar que el sensor SHT31 entrara en contacto directo con líquidos y de esta forma, solo recibiera el flujo de aire necesario para su funcionamiento.

**C. Diseño y Programación del Arduino y la App**

Una vez que el prototipo electrónico fue ensamblado considerando las especificaciones mencionadas en la sección anterior, fue necesario programar el Arduino y la aplicación para realizar las funciones pertinentes. Para lograr esto, se siguió el proceso que se muestra en la Figura 4. Básicamente, ambos códigos tienen la capacidad de comunicarse entre sí a través de la conexión inalámbrica. En el caso de Arduino, el entorno de programación maneja dos funciones principales. En la primera de ellas denominada función Setup, se agregan

las librerías necesarias para comunicarse y adquirir datos de los componentes, así como las variables globales para manejar la información. En segundo lugar, para el caso de la función de bucle o función loop, la comunicación serial se inicializa y se adquiere la información del sensor y GPS para almacenarla en las variables y enviarlas al teléfono inteligente.

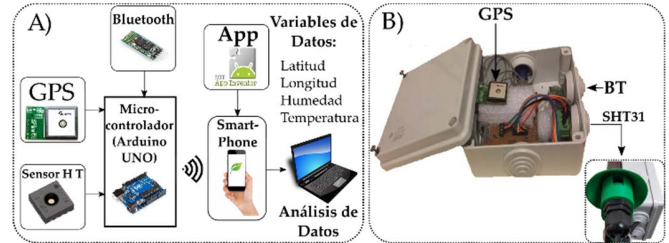


Fig. 3. Esquema general del prototipo electrónico propuesto: (A) Tipos de datos generados por el dispositivo electrónico así como componentes electrónicos que integran al mismo, donde la comunicación serial se brinda de forma inalámbrica a través de Bluetooth con el Smartphone, (B) Vista interior y exterior del prototipo electrónico (inferior derecha, estructura plástica para el SHT31).

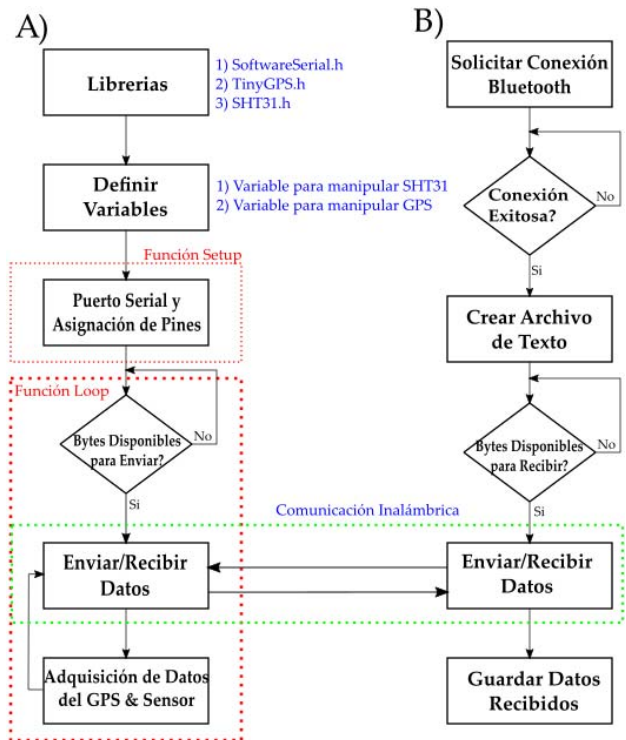


Fig. 4. Diagrama de flujo metodológico para la programación del Arduino y su respectiva aplicación para Smartphone. (A) Esquema o flujo de programación para el Arduino, (B) Proceso de programación de la aplicación de Smartphone para la recepción y almacenamiento de datos.

**D. Datos Satelitales para Percepción Remota**

Las imágenes satelitales utilizadas en esta investigación son productos de la plataforma satelital Landsat 8 cuyas características indispensables para el cálculo de los índices de vegetación propuestos se muestran en la Tabla 1. A partir de este dato, la adquisición de las mediciones in-situ se realizó con una ventana temporal promedio de dos días con respecto a la adquisición de las imágenes satelitales. Las imágenes de satélite se adquirieron con una resolución temporal de 30 días,

esto para detectar un cambio en la vegetación durante las etapas vegetativas (VE - VT). Así mismo, para obtener las imágenes de satélite que cubrían las fechas específicas y que contenían todas las bandas necesarias, se utilizó el siguiente enlace: <https://libra.developmentseed.org/>. Tres imágenes de satélite con sus respectivas bandas (ver Tabla 1) correspondientes a los meses de enero, febrero y marzo del año 2017 fueron pre procesadas mediante la aplicación de calibración radiométrica y corrección atmosférica. Posteriormente, se calcularon los índices de vegetación NDVI, WDRVI, CVI.

TABLA I  
CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS DEL SENSOR OPERATIONAL LAND IMAGER (OLI) DE LA PLATAFORMA SATELITAL LANDSAT 8

Banda	$\lambda_{min} (\mu m)^*$	$\lambda_{max} (\mu m)^*$	Resolución Espacial (m)	Resolución Temporal (días)
Verde	0.53	0.59	30	15
Rojo	0.64	0.67	30	15
Infrarrojo Cercano	0.85	0.88	30	15

\* Longitud de onda ( $\lambda$ ) expresada en micrómetros ( $\mu m$ ).

### E. Índices de Vegetación y Técnicas de Percepción Remota

Como se mencionó anteriormente, una vez que se adquirieron las imágenes de satélite, se aplicó un pre procesamiento para reducir los efectos atmosféricos mediante la Calibración Radiométrica y la Corrección Atmosférica, lo anterior se realizó en una PC utilizando el software ENVI 5.3 antes del cálculo de los índices de vegetación.

El primer índice utilizado fue el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). En general, este índice se usa actualmente en estudios de vegetación e indica el verdor de la hoja. Además, se usa para tomar decisiones en la agricultura de precisión, como la detección de malezas, la fumigación con herbicidas, la velocidad y el tiempo de aplicación de fertilizantes nitrogenados, etc. [28]. El NDVI se puede representar con la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{\delta NIR - \delta RED}{\delta NIR + \delta RED} \quad (1)$$

Donde el valor resultante de dividir píxel por píxel los valores de reflectancia se encuentran acotados en un rango entre -1 y +1, con un umbral crítico alrededor de 0.2, en el cual a partir de este valor existe un buen desarrollo vegetal. Por el contrario, valores inferiores a 0.2 indican vegetación enferma y suelo desnudo, a medida que se acerca a 0 indica suelo húmedo o agua [1].

El segundo índice utilizado fue el Índice de Vegetación de Rango Dinámico Amplio (WDRVI). Este índice es una variación del NDVI, que surge de la necesidad de mejorar la sensibilidad de saturación que presenta el NDVI cuando el índice de área foliar (IAF) de un área de vegetación es mayor de dos [16]. Este índice se define mediante la siguiente ecuación:

$$WDRVI = \alpha \cdot \frac{\delta NIR - \delta RED}{\delta NIR + \delta RED} \quad (2)$$

Donde la variable  $\alpha$  es un peso que se multiplica con la banda NIR de la imagen del satélite y puede tomar valores acotados desde 0.1 a 0.2 resaltando las características biofísicas de la vegetación, para el caso del maíz se utilizó  $\alpha = 0.1$ . Permitiendo establecer una mejor relación entre el cultivo de maíz y el IAF [5]. Así mismo, altos valores de Niveles Digitales (ND) de este índice, pueden interpretarse como exceso de fertilizantes nitrogenados [5].

Finalmente, el último índice utilizado fue el Índice de Vegetación de Clorofila (CVI). Este índice está optimizado para predecir la concentración de clorofila en la vegetación [29] y se calcula en términos del producto de la banda de infrarrojos multiplicado por la proporción de bandas rojas y verdes:

$$CVI = \delta NIR (\delta RED / \delta GREEN)^2 \quad (3)$$

En los últimos años, se ha demostrado que el estudio y medición del contenido de clorofila foliar para determinar el estado nutricional de la planta permite determinar la aplicación adecuada de fertilizantes nitrogenados en función de la clorofila contenida en la vegetación [5].

## III. RESULTADOS

Esta sección resume y proporciona una descripción concisa y precisa de los resultados experimentales, así como su interpretación en términos de varias conclusiones.

Para el análisis multiespectral de la vegetación, se realizó el proceso cada 30 días para detectar un cambio visible en el crecimiento del maíz y, en consecuencia, ilustrar un cambio de la etapa fenológica [30]. Por lo tanto, los índices de vegetación propuestos se calcularon y analizaron de forma independiente (ver Figura 5) utilizando el software ENVI 5.3. Luego, la generación de los mapas y la clasificación de los mismos se realizó en una PC con el software ArcGIS 10.5.

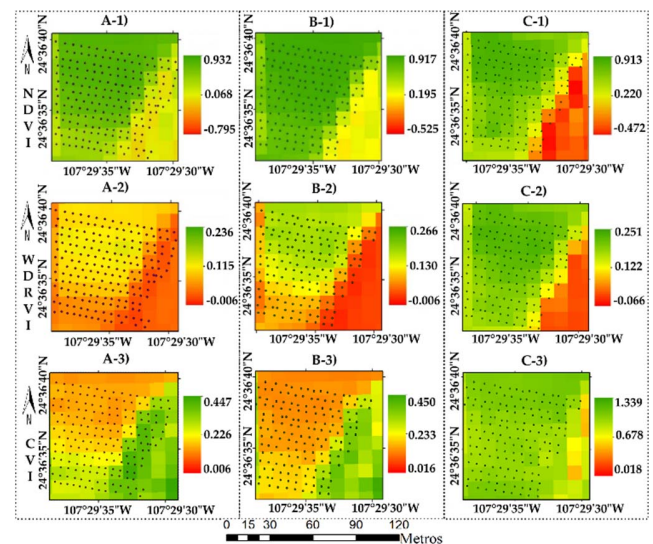


Fig. 5. Resultado del procesamiento multiespectral para los índices NDVI, WDRVI y CVI en conjunto con el prototipo electrónico - (A) Enero con una altura promedio del maíz de 55 cm, (B) Febrero con una altura promedio del maíz de 180 cm, (C) Marzo cuando el maíz se encuentra en su etapa de floración y comienza a observar diferencias en su desarrollo.



Con base en la Figura 5, se pueden establecer las siguientes observaciones: para el mes de enero, el maíz es visible y alcanza una altura de aproximadamente 55 cm. En este caso, el NDVI refleja una vegetación saludable ya que el promedio alcanza 0.594 ND (Tabla 2). En el caso del WDRVI, el promedio alcanza 0.067 siendo más bajo que el NDVI, indicando un área con poca vegetación o salud de las plantas. Para el CVI, el promedio es 0.235 que ilustra una relación con los otros índices de vegetación, permitiendo comprender el comportamiento de este último donde tiende a disminuir su valor a medida que se incrementa con respecto a los otros dos. Es decir, detecta un mayor contenido de clorofila en la parte norte de la parcela.

TABLA II

DATOS ESTADÍSTICOS DE LA CAMPAÑA DE ENERO 2017

Estadística	NDVI	WDRVI	CVI	Humedad (%)	Temp (°C)
Mín	0.151	0.012	0.13	57.13	25.05
Max	0.837	0.117	0.394	68.73	28.79
Media	0.594	0.067	0.235	63.81	26.44
Desv. Estándar	0.052	0.031	0.079	2.603	0.913

Para los datos *in-situ* obtenidos por el prototipo electrónico, se observa en el mapa de interpolación de humedad que las zonas norte y sur de la parcela reportan valores menores con respecto a la zona central (ver Figura 6). En general, en enero se registró la mayor cantidad de humedad de la parcela. Así mismo, como caso contrario, se presenta en el mapa de temperatura que las zonas norte y sur presentaron valores más altos con respecto a la zona central. Por tal motivo, se demostró que para este mes ambos factores están correlacionados.

Además, cabe mencionar que tanto la humedad como la temperatura, se mantienen dentro del rango establecido, que es muy importante en el desarrollo del maíz, donde la humedad promedio es del 63.81% y la temperatura promedio es de 26.44 °C (Tabla 2). Por consiguiente, se puede afirmar que este mes no presenta un problema con respecto a estos factores. Sin embargo, el resultado WDRVI indicó un exceso de fertilización relacionado con ciertos puntos de control en la zona norte, donde se apreciaron valores más altos con respecto a los otros puntos de la parcela.

Durante enero, la etapa fenológica del maíz es V8, considerada una etapa temprana de crecimiento donde la aplicación de fertilizantes nitrogenados en proporciones precisas es crucial. Sin embargo, si se aplican pequeñas proporciones de fertilizantes durante las primeras etapas del crecimiento del maíz, no tendrá los nutrientes necesarios para alcanzar la madurez y tendrá un impacto directo en el rendimiento esperado. De lo contrario, si se aplicaran proporciones excesivas de fertilizante, el exceso de nitrógeno permanecería en el subsuelo contaminando los acuíferos porque el maíz solo puede absorber una cierta cantidad de nutrientes.

Durante la campaña de medición *in-situ* de febrero, la altura del maíz cambió considerablemente con respecto al mes anterior, alcanzando aproximadamente 180 cm, ingresando a la etapa fenológica V16. Donde el NDVI reflejó un promedio de 0.717 (ver Tabla 3) y visualmente, se puede observar que la saturación o pérdida de sensibilidad en el infrarrojo continúa a medida que la vegetación se vuelve más densa.

Sin embargo, este índice continúa indicando que la vegetación está en buen estado y que los valores digitales de los píxeles continúan estando muy por encima del umbral crítico. En el caso del WDRVI, este índice demostró un posible problema de estado nutricional en el maíz. Por lo que sería necesario aumentar la aplicación de fertilizante de nitrógeno en la parte sur de la parcela, más específicamente, en los puntos de control de la zona central. Por otro lado, se puede observar que los puntos de control de la zona norte obtuvieron valores digitales de pixel (ND) mayores que los otros puntos. Por esta razón, es probable que estos puntos de control requieran menos fertilizante. El índice CVI contrastó los resultados del WDRVI, donde también hubo un mayor contenido de clorofila en el área norte y central de la parcela y un menor contenido en el área sur. Por lo tanto, se puede concluir que el rendimiento total de la parcela posiblemente se vea afectado por su parte sur.

Los mapas de humedad y temperatura para el mes de febrero continuaron indicando datos satisfactorios, como un ejemplo de esto, la humedad media es del 64.16% y la temperatura es de 26.33 ° C (ver Tabla 3). Esto indica que ambos factores se mantienen dentro del rango aceptable para que el maíz tenga un crecimiento saludable. Una vez más, ambos factores están correlacionados, ya que la zona norte de la parcela presenta una humedad más alta y, al mismo tiempo, una temperatura más baja, así como la zona sur presenta una humedad más baja y una temperatura más alta.

Para el mes de marzo, se percibe una ligera variación con respecto al índice NDVI del mes anterior. Sus valores no están saturados, como en el caso de febrero. Esto indica valores más bajos en el área sur de la parcela. En el caso del índice

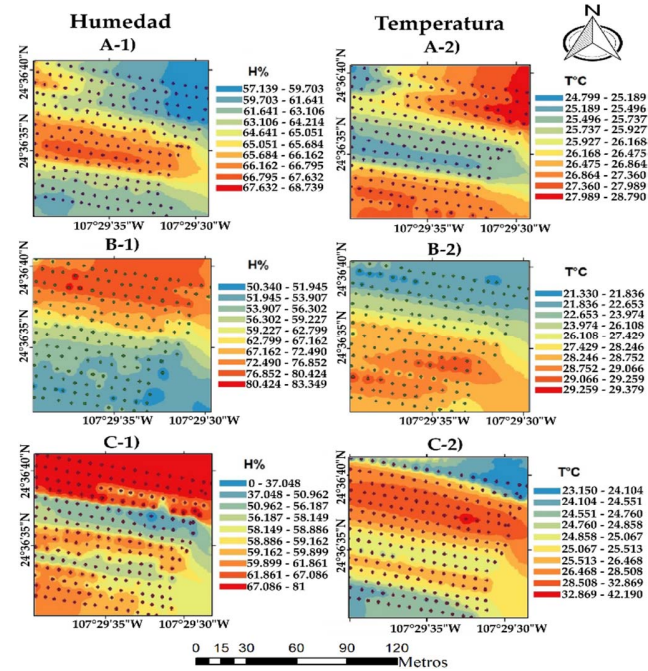


Fig. 6. Mapas de interpolación resultantes de los datos recopilados por el prototipo electrónico (A-1 y A-2) humedad y temperatura de Enero, (B-1 y B-2) humedad y temperatura de Febrero, y (C-1 y C-2) humedad y temperatura de Marzo.

WDRVI, los valores de este aumentaron mostrando áreas que van desde regulares hasta buenas en relación con la salud de la planta. Además, el índice CVI indicó mejoras en la vegetación de clorofila en el área sur de la parcela. Finalmente, las estadísticas de marzo se indican en la Tabla 4, donde se resume un aumento mínimo en los valores digitales del NDVI y WDRVI.

TABLA III

DATOS ESTADÍSTICOS DE LA CAMPAÑA DE FEBRERO 2017

Estadística	NDVI	WDRVI	CVI	Humedad (%)	Temp (°C)
Min	0.212	0.021	0.13	50.34	21.33
Max	0.867	0.182	0.346	83.34	29.37
Media	0.717	0.118	0.199	64.16	26.33
Desv.	0.161	0.045	0.178	11.01	2.95
Estándar					

TABLA IV

DATOS ESTADÍSTICOS DE LA CAMPAÑA DE MARZO 2017

Estadística	NDVI	WDRVI	CVI	Humedad (%)	Temp (°C)
Min	0.304	0.057	0.164	42.04	23.15
Max	0.871	0.209	0.438	81	33.88
Media	0.786	0.166	0.22	60.83	26.44
Desv.	0.127	0.038	0.069	8.02	2.37
Estándar					

Usando un algoritmo desarrollado para técnicas de superposición, la cual consiste en la composición de una imagen resultante a partir de dos imágenes originales RGB utilizando el método de falso color. Las imágenes del índice WDRVI se súper-posicionaron con mapas de interpolación climatológica para correlacionar los datos in-situ proporcionados por el prototipo electrónico y el índice de vegetación (ver Figura 7) utilizando el software MATLAB R2016b. Para esto, se utilizó un peso ( $\alpha$ ) de 0,7 para disminuir la saturación de píxeles de los mapas climatológicos en el WDRVI, lo anterior permitió resaltar la contribución del índice en la imagen resultante. Al mismo tiempo, las áreas se visualizaron con variaciones relativas de humedad y temperatura.

Como es posible observar en la Figura 7, los nuevos mapas de superposición permiten identificar vegetación desarrollada con su respectivo índice de humedad y temperatura, estableciendo un rango de calidad en longitudes de onda en torno al verde, permitiendo excluir aquellos píxeles que indican poca vegetación (amarillo y azul).

Con el objetivo de corroborar los nuevos resultados mostrados en la Figura 7, se calculó el coeficiente de correlación para cada imagen de superposición de humedad y temperatura (ver Figura 8). En el caso del mes de febrero, se encontró una correlación negativa moderada entre la temperatura y el desarrollo fenológico del maíz. Sin embargo, con la finalidad de validar o descartar este caso único, es necesario ampliar el análisis temporal en la misma etapa vegetativa del cultivo.

Con base en los resultados obtenidos sobre la calidad de la vegetación en el cultivo de maíz generado a partir del procesamiento digital de imágenes multiespectrales de los tres meses seleccionados, y el análisis de los resultados de las imágenes de superposición, se obtuvo una predicción de

rendimiento estimado de la parcela, esto se ilustra en la Figura 9 y la Figura 10, respectivamente.

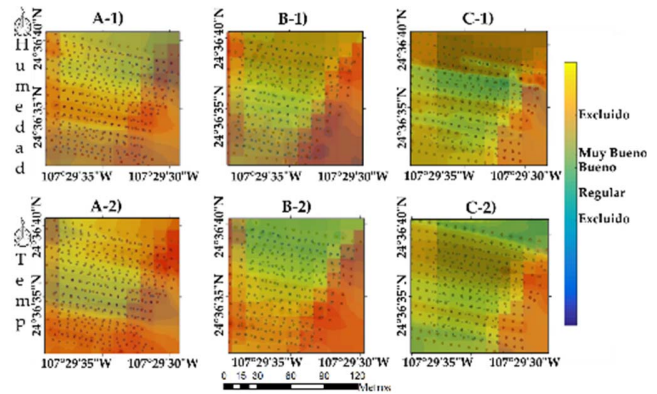


Fig. 7. Imágenes fusionadas de los mapas de interpolación y el índice WDRVI - (A) Enero, (B) Febrero y (C) Marzo.

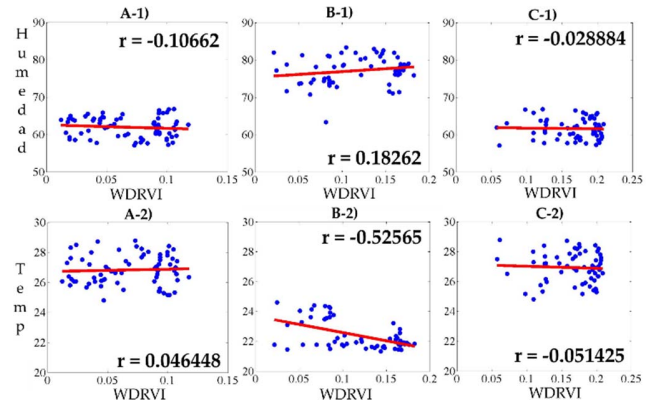


Fig. 8. Correlaciones 2-D de imágenes fusionadas - (A) Enero (B) Febrero y (C) Marzo.

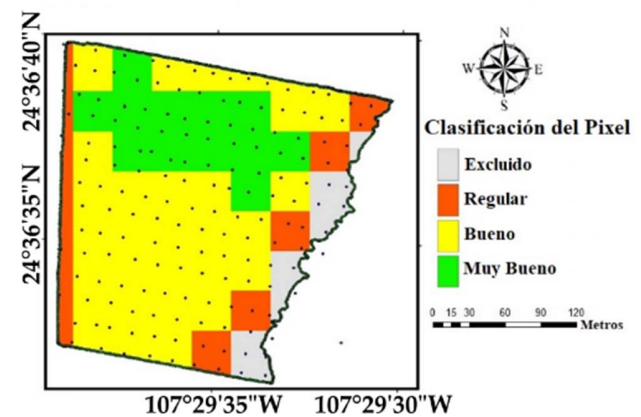


Fig. 9. Mapa de predicción de rendimiento estimado, con base en la clasificación de píxeles y las imágenes WDRVI del mes de marzo.

Para realizar la predicción del rendimiento (ver Figura 10), se seleccionó el índice WDRVI del mes de marzo ya que mostraba gráficamente el contraste entre la vegetación con buen desarrollo (al norte de la parcela) y la vegetación con menor desarrollo (al sur de la parcela). Así mismo, durante los meses previos, las imágenes de superposición mostraron una correlación moderada con al menos uno de los dos factores ambientales analizados en esta investigación. Por lo tanto, se

diseñaron seis rangos o campos para clasificar el desarrollo de la vegetación basándose en los ND de los píxeles. Para el mejor desarrollo se determinó un rango entre 0.2 hasta el valor máximo registrado, así mismo, para el resto de los campos, se calcularon rangos en decrementos de 0.03 ND tomando como referencia 0.2 ND.

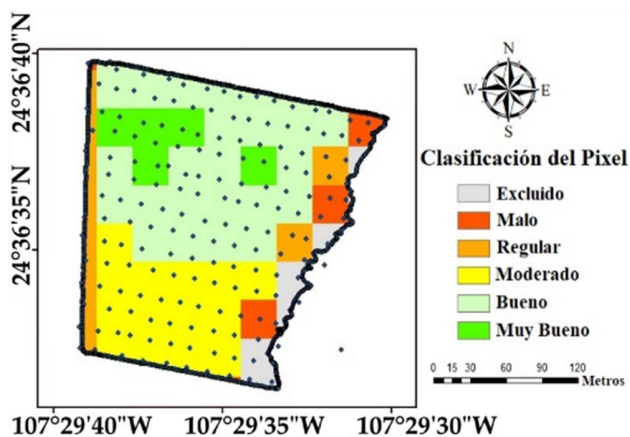


Fig. 10. Mapa de predicción de rendimiento estimado basado en la clasificación de píxeles, imágenes climatológicas fusionadas y WDRVI desde el mes de marzo.

Con base en el Departamento de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México (SAGARPA), para el ciclo de siembra y cosecha de maíz del año 2017, en el estado de Sinaloa, México, se estimó un rendimiento promedio de 10 t / ha.

Por lo tanto, con base en esta información y en el mapa de rendimiento fue posible estimar el rendimiento obtenido por la parcela al final del ciclo (Tabla 5) en función de la resolución espacial de Landsat 8 y el número de píxeles dentro de cada rango.

TABLA V  
CÁLCULO ECONÓMICO DEL RENDIMIENTO ESTIMADO PARA LA COSECHA DE MAÍZ

	Malo	Regular	Moderado	Bueno	Muy Bueno
Hectáreas	0.27	0.23	1.26	2.29	0.45
Toneladas	2.16	8.75	11.97	24.04	4.95
	Total (Ton)				51.87

#### IV. CONCLUSIÓN

La precisión del GPS del prototipo electrónico fue aceptable para este tipo de aplicaciones (~ 5m), donde la mayoría de los puntos de control se encuentran dentro del polígono de referencia; enero 95%, febrero 95% y marzo 96% del área total. Conforme al monitoreo de humedad y temperatura ambiental, no se registraron temperaturas excedentes que pudieran afectar la salud del cultivo de maíz (Mín.: 21 ° C, Máx.: 33 ° C). Sin embargo, se le atribuye la correlación inversa entre ambos factores a la evapotranspiración del cultivo, el cual se encuentra en función de las características del cultivo, así como el clima de la zona. El SIG generado con base al procesamiento multiespectral de las imágenes satelitales y los mapas de interpolación de humedad y

temperatura permitieron identificar salud vegetal deficiente (en la zona sur de la parcela) en cultivos durante las primeras etapas de crecimiento (V3 a V12) debido a distintos factores, como, por ejemplo, falta de fertilizante, estrés hídrico, plagas o composición química del suelo. Así mismo, las imágenes de superposición permitieron identificar y contrastar el monitoreo del desarrollo de la planta en función del índice WDRVI para el mapa de predicción de rendimiento durante las etapas fenológicas y de fertilización críticas. Por consiguiente, el consumo eléctrico promedio de todo el dispositivo fue de aproximadamente 135 mA, por lo tanto, se garantiza un promedio de 74.07 horas de trabajo con una batería externa de 10 000 mAh. Finalmente, al término del ciclo, el agricultor reportó un rendimiento total de 10.82 ton/ha, así como una producción total de 49.2 toneladas de maíz. Comparando estos datos con los valores de producción previamente calculados (Tabla V), se puede concluir que existe una diferencia de 2.66 toneladas con respecto a los datos reales, lo cual corresponde a solo un 5.42% de error con respecto a los mismos. Por lo tanto, la predicción del rendimiento alcanzada por el mapa de rendimiento conlleva a una precisión del 94.58%, misma que puede ser mejorada al continuar aplicando recursivamente la metodología por varios ciclos seguidos.

#### V. DISCUSIÓN

En cuanto al prototipo electrónico, se llevaron a cabo tres campañas in-situ en diferentes momentos del día, para verificar el funcionamiento del prototipo en el campo y la confiabilidad de la información generada por él. La razón para elegir un programa matutino para la fase experimental es que durante las primeras horas de la mañana existe una gran cantidad de humedad en la vegetación, por lo que el encapsulado donde se montó el prototipo debe evitar que ingrese esta humedad al sistema electrónico, así como cualquier otro factor climatológico para evitar dañar el prototipo. Además, generalmente es durante la mañana cuando los agricultores se encuentran fertilizando la cosecha de maíz. Cabe mencionar que, un parámetro de gran importancia en este tipo de investigaciones es la humedad del suelo, para este trabajo en particular no se consideró este parámetro debido a las características que presenta el suelo de la parcela durante horario diurno, las cuales dificultan la toma de mediciones basadas en él suelo. Finalmente, la resolución espacial de LandSat 8 es una limitante para realizar un cálculo más preciso del rendimiento en parcelas relativamente pequeñas, por lo que imágenes con mayor resolución deberían de proporcionar mejores estimaciones. Así mismo, se trabajará a futuro con factores biológicos como la temperatura foliar, con el objetivo de realizar análisis más robustos.

#### REFERENCIAS

- [1] Acharya, T. and Ray,A.K. "Image Processing: Principles and Applications". Hoboken, N.J: *John Wiley & Sons, Inc.* 2005, pp. 1-11.
- [2] Zhang, C., Jin, H., Liu, Z., Li, Z., Ning, M and Sun, H. "Seed maize identification based on texture analysis of GF remote sensing data", *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, Vol. 21, 2016, DOI: 32. 183-188. 10.11975/j.
- [3] Rodrigues Jr, Francelino., Defourny, P., Gérard, B., San Vicente, Felix and Loladze, Alexander. "Use of remote sensing technology in the assessment of resistance of maize to tar spot complex". *Advances in Animal*



- Biosciences*, vol. 8, pp. 259-263, 2017, DOI: 10.1017/S2040470017001212.
- [4] Han, W., Li, G., Yuan, M., Zhang, L. and Shi, Z. "Extraction method of maize planting information based on UAV remote sensing technology". *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. Vol. 48, pp. 139-147, 2017.
- [5] Maresma, A., Ariza, M., Martínez, E., Lloveras, J. and Martínez-Casasnovas, J. A. "Analysis of Vegetation Indices to Determine Nitrogen Application and Yield Prediction in Maize (*Zea mays* L.) from a Standard UAV Service". *Remote Sens*, vol. 8, pp. 3-13, 2016, DOI: 10.3390/rs8120973.
- [6] Albarenque, S. M. and Vélez, J. P. "Técnicas para el procesamiento de mapas de rendimiento", 1a ed.; INTA: Paraná, Argentina. pp. 12-26, 2011.
- [7] Bragachini, M., Bianchini, A., and Martini A. "Nueva Herramienta de Agricultura de Precisión: Banderillero Satelital DGPS como Guía de Pulverizadoras, Fertilizadoras y Sembradoras"., INTA Manfredi, pp. 2-7, 1999.
- [8] Dahms, Thorsten., Babu, Dinesh., Borg, Erik and Schmidt, Marco. "Derivation of biophysical parameters from fused remote sensing data". *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 4374-4377, 2017, DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127970.
- [9] Bragachini, M., Martini A. and A. Méndez. "Componentes de Agricultura de Precisión"., INTA Manfredi, pp.1-20, 2000.
- [10] Bragachini, M., A. Méndez. and F. Scaramuzza. "Monitor de Rendimiento y Conocimientos de Calibración". INTA Manfredi, pp.1-6, 2006.
- [11] Apageorgiou, Elpiniki., T. Markinos, Athanasios and Gemtos, T. "Fuzzy cognitive map-based approach for predicting yield in cotton crop production as a basis for decision support system in precision agriculture application". *Appl. Soft Comput.* Vol. 11, pp. 3643-3657, 2011, DOI: 10.1016/j.asoc.2011.01.036.
- [12] García, E. and Flego, F. "Tecnoagro". [Online] Available: <https://tecnoagro.com.mx/revista/2015/no-99/agricultura-de-precision-parte-2-de-4/>. Accessed on: 12 November 2016.
- [13] L. Fernando D Haro, R. Cordoba, J. Ignacio Rojo Rivero, J. Diez de la Fuente, D. Avendano Peces and J. Maria Bermudo Mera, "Low-Cost Speaker and Language Recognition Systems Running on a Raspberry Pi," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 4, pp. 755-763, June 2014.
- [14] D. Herrera, S. Tosetti and R. Carelli, "Dynamic Modeling and Identification of an Agriculture Autonomous Vehicle," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 6, pp. 2631-2637, June 2016.
- [15] Govaerts, B. and Verhulst, N. "The normalized difference vegetation index (NDVI) Greenseeker (TM) handheld sensor: toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concepts and case studies". CIMMYT: Distrito Federal, México, pp. 12, 2010.
- [16] Gitelson, A. A. "Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation". *J. Plant Physiol.* vol. 161, pp. 165-173, 2004, DOI: 10.1078/0176-1617-01176.
- [17] Silva Junior, Carlos Antonio, Nanni, Marcos, Teodoro, Paulo and Silva, Guilherme. "Vegetation Indices for Discrimination of Soybean Areas: A New Approach". *Agronomy journal*. Vol. 109, No. 4, pp. 1331-1343, 2017, DOI: 10.2134/agronj2017.01.0003.
- [18] Gitelson, A. and Merzlyak, M. N. "Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation". *J. Plant Physiol.*, vol. 143, pp. 286-292, 1994, DOI: 10.1016/S0176-1617(11)81633-0.
- [19] Kemerer A., Di Bella C., Melchiori R., Arnold B. and Alvarez R. "Comparación de índices espectrales para la predicción del IAF en canopeos de maíz". *Teledeteccion*, pp. 125-129, 2007, ISBN: 978-987-543-126-3.
- [20] Vincini, M. and Frazzi, E. "Comparing narrow and broad-band vegetation indices to estimate leaf chlorophyll content in planophile crop canopies". *Precision Agriculture*. Vol. 12, No. 3, pp. 334-344, 2010, DOI: 10.1007/s11119-010-9204-3.
- [21] Mousaei Sanjerehei, M. "Assessment of spectral vegetation indices for estimating vegetation cover in arid and semiarid shrublands". *Range Management and Agroforestry*, Vol. 35, No. 1, pp. 91-100, 2014.
- [22] Chemura, Abel., Mutanga, Onesimo., Odindi, John and Kutuywayo, Dumisani. "Mapping spatial variability of foliar nitrogen in coffee (*Coffea arabica* L.) plantations with multispectral Sentinel-2 MSI data". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 138, pp.1-11, 2018, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.02.004.
- [23] Linares, R., Quijano, J. A. and Holguín, G. A. "Implementación del protocolo Bluetooth para la conexión inalámbrica de dispositivos electrónicos programables". *Scientia Et Technica*, Vol. 1, No. 24, pp. 31-36, 2004.
- [24] Miller, B.A. and Bisdikian, C. "Bluetooth Revealed: The Insider's Guide to an Open Specification for Global Wireless Communications", 2nd ed.; *Prentice Hall PTR*, pp. 127-156, 2001.
- [25] Burnette, E. and Hello, "Android: Introducing Google's Mobile Development Platform", 4rd ed., *The Pragmatic Programmers*, United States of America, pp. 3-13, 2015.
- [26] Sensirion. "Product Datasheet SHT3x.DIS". [Online] Available: <https://www.sensirion.com/>, Accessed on: 27 November 2016.
- [27] Electronics, Core. "JYMCU Bluetooth to UART Wireless Serial Port Module for Arduino". [Online] Available: <https://core-electronics.com.au/>, Accessed on: 03 December 2016.
- [28] Manasah, S. M., Milton, S. M. and Nkosazana N. M. "Early maize yield forecasting in the four agro-ecological regions of Swaziland using NDVI data derived from NOAA's-AVHRR". *Agric For Meteorol*, Vol. 129, pp. 1-9, 2005. DOI: 10.1016/j.agrformet.2004.12.006.
- [29] Broge, N. H. and Leblanc, E. "Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density". *Remote Sens Environ*, Vol. 76, pp. 156-172, 2001, DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00197-8.
- [30] Wang, C., Li, J., Liu, Q., Bai, J., Xu, B., Zhao, J and Zeng, Y. "Validation and analysis of remote sensing phenology products in the Heihe River Basin. Yaogan Xuebao". *Journal of Remote Sensing*. Vol. 21, pp. 442-457, 2007, DOI: 10.11834/jrs.20176184.



**Carlos Alberto Martínez Félix** received the B.E. degree in Mechatronics from Instituto Tecnológico de Culiacán, Culiacán, México in 2012, and the M.Sc. degree in Information Science from Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, México in 2017. He is currently working toward the Ph.D. degree at the Department of Earth and Space Science, UAS, Culiacán, Mexico. His research interests include the remote sensing of the environment using GPS/GNSS Multipath Reflectometry.

**G. Esteban Vazquez B.** is an associate professor at the Autonomous University of Sinaloa, Mexico. His research interest covers GPS atmospheric research and precise DGPS static positioning and deformations. He is currently a member AGU, IAG and ION and recipient of the 2006 ION Graduate Student Award.

**Jesus Roberto Millan Almaraz.** Received the B.E. degree in electronics engineering from the Mazatlan Institute of Technology, Mazatlan, Mexico, in 2006, M.E. degree in electrical engineering from the University of Guanajuato, Guanajuato, Mexico, in 2008 and PhD from the Autonomous University of Queretaro, Queretaro, Mexico. He is working currently at Physics and Mathematics Faculty, Autonomous University of Sinaloa, Culiacan, Mexico. His research interests include digital signal processing, instrumentation, and embedded systems. IEEE Membership: 94123954.





**Felipe G. Nievinski.** Received the B.E. degree in geomatics from Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre-RS, Brazil, in 2005, the M.Sc.E. degree in geodesy from the University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada, in 2009, and the Ph.D. degree in aerospace engineering sciences from the University of Colorado Boulder, Boulder, CO, USA, in 2013.



**J. Ramon Gaxiola Camacho** received his M.S. and Ph.D. in Civil Engineering and Engineering Mechanics from the University of Arizona in 2015 and 2017, respectively. Since June 2017, he is an Assistant Professor in the Civil Engineering Department at the Autonomous University of Sinaloa in Mexico. His research topics are related to reliability analysis and probabilistic methods, performance-based seismic design, earthquake engineering, and health assessment of infrastructure.



**Angela Melgarejo Morales,** received the B.E. degree in Computer Science from the Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlan, Mexico, in 2015, M.Sc. degree in Information Science from the Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), Culiacan, Mexico in 2017. She is currently a full-time student in the Ph.D. program at the Department of Earth and Space Science from UAS. Her research interests involve ionospheric anomalies via GPS data and its correlation with earthquake forecasting.