

Detección de índice de área foliar por firma espectral de cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.)

Jorge Serrano Reyes, Ing¹, José Fábrega, PhD^{1,3}, Evelyn Quirós, PhD^{1,3}, José Ulises Jimenez, Msc¹, Javier Sanchez-Galan, PhD¹

¹Universidad Tecnológica de Panamá, ²Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá, ³Investigador Distinguido del Sistema Nacional de Investigación de Panamá, jorge.serrano1@utp.ac.pa, jose.fabrega@utp.ac.pa, jose.ulises@utp.ac.pa, Javier.sanchezgalan@utp.ac.pa

Resumen— El objetivo del estudio fue determinar las longitudes para la detección espectral del índice de área foliar en cultivo de arroz variedad IDIAP 52-05. Se realizaron mediciones de campo con un espectrorradiómetro y medidas de campo de área foliar. Del análisis de componentes principales realizado se obtuvo las longitudes de mayor variación en el tiempo resultando en las longitudes 820.63 nm, 479.53 nm y 731.28 nm. De las cuales sólo 479.53 y 820.68 resultaron significativas para un modelo de regresión con un $r=0.94$. Se comparó este modelo con la estimación utilizando NDVI y el índice triangular modificado MTVI2, con valores de R^2 de 0.75 y 0.97, respectivamente.

Keywords—detección espectral, arroz, lai, firma hiperspectral, reflectancia.

I. INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa* L.) es una de las fuentes principales de consumo de calorías para más de la mitad de la población mundial, de allí su importancia para dedicar esfuerzos en el desarrollo tecnológico para su producción.

La firma espectral es la forma peculiar en la que una determinada cobertura terrestre responde en distintas longitudes de onda; ésta es básica para reconocer cubiertas de interés y discriminarlas de otras similares, por lo que la obtención de las firmas espectrales se recomiendan como punto de partida en trabajos de teledetección [1].

Las medidas de reflectancia son utilizadas para desarrollar índices espectrales de vegetación (ejemplos: NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*; SAVI, *Soil Adjusted Vegetation Index*; MTVI2, *Modified Transformed Vegetation Index*) los cuales se correlacionan a variables como: área foliar, biomasa, contenido de nitrógeno, contenido de clorofila, detección de enfermedades, etc. Los índices espectrales de vegetación se ponen a prueba para determinar cuales tienen mayor correlación con características específicas en los cultivos.

Por ejemplo, [2] puso a prueba 43 índices de vegetación para determinar cuales eran los mejores para estimar el índice de área foliar en maíz, avena, papa y varios otros cultivos. Igualmente, [3] probó 9 índices de vegetación para encontrar cuales eran los mejores para estimar el índice de área foliar y cantidad de biomasa en cultivos de maíz y soja; y [4] ensayó con 6 índices de vegetación para establecer cuales eran los mejores para estimar el índice de área foliar en cultivos de trigo. Por su parte, [5] probó 43 índices de

vegetación en relación al contenido de nitrógeno en las hojas de cultivos arroz.

Uno de los importantes indicadores de productividad y capacidad fotosintética es el índice de área foliar (LAI) [6]. El LAI es la relación de área de las hojas por área de suelo [7].

El LAI es utilizado para establecer índices de crecimiento que pueden ser relativos midiendo su razón de cambio con respecto a la incorporación de algún nutriente, la relación de área foliar (RAF) relaciona el área foliar y la masa seca generada y la tasa de asimilación neta (TAN) evalúa la eficiencia fotosintética tomando en cuenta la masa seca, el área foliar y el tiempo [8].

El índice de área foliar se puede determinar de varias maneras según la definición que se utilice. El método óptico puede ser utilizando el LAI proyectado que consiste en el área de sombra horizontal que se proyecta debajo de una hoja horizontal [9]. Ejemplos de este método se observan en equipos comerciales como el ceptómetro AccuPAR y el LAI-2000 Licor. Este método tiene el inconveniente que no distingue entre otras estructuras que pueden obstaculizar la luz.

En la teledetección del LAI en cultivos de arroz se ha elaborado trabajos como la supervisión del cultivo en la etapa de cosecha donde se estudia el efecto la presencia de la panícula en la estimación del LAI [10].

Otros estudios analizan toda la firma espectral del cultivo para obtener las bandas que mejor de correlacionen al LAI para luego hacer una regresión múltiple como [11], en el cual se sugiere 15 bandas para estimar por teledetección el LAI en cultivos de arroz.

Este trabajo tiene como objetivos: primero, encontrar que longitudes de onda son las más favorecidas para para estimar de manera espectral el índice de área foliar.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Firma espectral

EL sitio de estudio se localiza en la finca TESKO, en Juan Hombrón, Provincia de Coclé, en las coordenadas 8° 19' N, 80° 13' O. Las mediciones espectrorradiométricas se realizaron entre junio y septiembre del 2017, entre las 10:00 a.m. y las 2:30 p.m., las mismas son georreferenciadas utilizando un GPS *Garmin eTrex*. Se empleó un

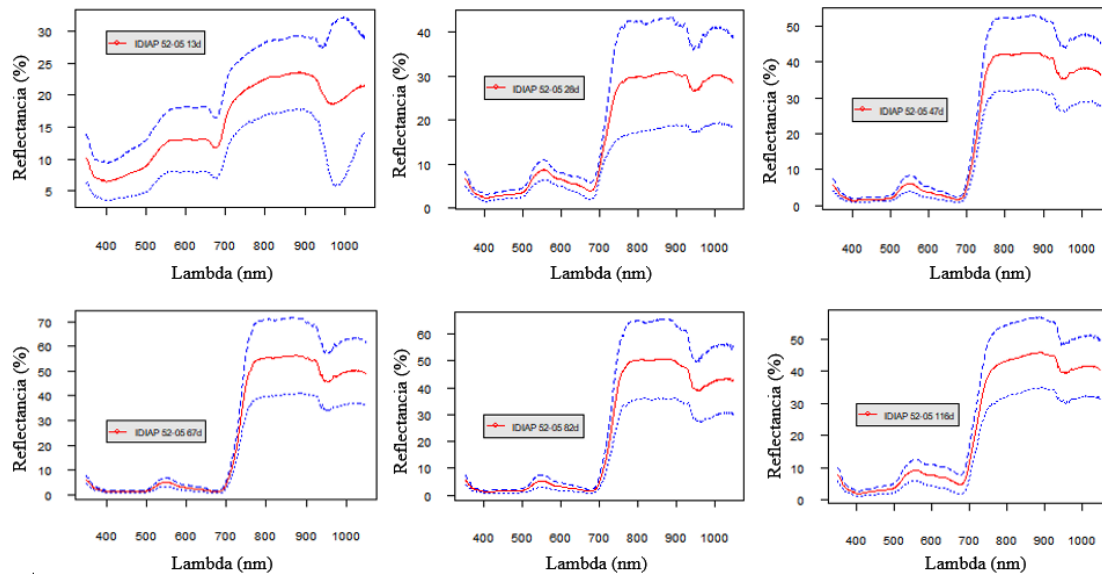


Fig. 1 Firma espectrales promedio a los 13,28,47,67,82 y 116 de días de siembra

Espectrorradiómetro (GER 1500 de *Spectra Vista Corporation*) que cubre un rango de 350 nm a 1050 nm, con un campo de visión de 8°. Antes de cada toma de firma, se realiza una medida de referencia sobre una superficie semi-lambertiana calibrada, de color blanco, y conocida como *Spectralon*.

El material vegetal utilizado son las variedades de arroz IDIAP 52-05, que se caracteriza por cumplir su ciclo de vida entre 116 a 124 días después de siembra. Las plantas alcanzan una altura máxima entre 85-110 cm, y está adaptada a condiciones de riego y secano. Adicionalmente, es tolerante a *Pyricularia* y otros patógenos. Esta variedad fue escogida por ser una de las que presenta mejor rendimiento ante molinería y, por lo tanto, mejor calidad industrial.

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el programa R [12]. Se hizo un análisis de componentes principales (PCA por sus siglas en inglés) y se seleccionaron las longitudes de onda más favorecidas de acuerdo con la mayor magnitud de la correlación con las componentes para diferenciar los estados fenológicos.

Se seleccionaron los puntos representativos de la firma espectral del cultivo, después fueron llevadas al laboratorio para análisis. Para estimar el área foliar se separaron las hojas y fotografiaron, se utilizó luego el programa ImageJ para contar el área verde de las hojas en la fotografía escalada con un objeto de dimensión conocida.

III. RESULTADOS

A. Medidas de la firma espectral

En la figura 1 se muestran las firmas espectrales promedio de la variedad de arroz IDIAP 52-05 capturadas a los 13, 28, 47, 67, 82, 97 y 116 días.

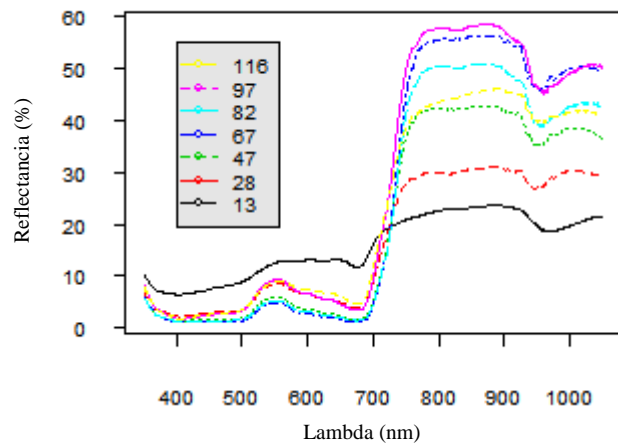


Fig. 2 Firma espectral de la variedad IDIAP 52-05 a diferentes días de siembra

B. Análisis de Componentes Principales

Para el PCA se utilizó la matriz de correlaciones. Los resultados señalan que con las dos primeras componentes es posible explicar el 98.5 % de la variación total, como se indica en la tabla 1.

TABLE I
DATOS DEL PCA PARA DIFERENTES FASES FENOLÓGICAS EN LA VARIEDAD DE ARROZ IDIAP 5205

Resumen	PC1	PC2	PC3
Desviación estándar	15.4279	13.8895	2.8962
Proporción de varianza	0.5325	0.4316	0.01877
Proporción acumulada	0.5325	0.9641	0.9828

La figura 3, muestra el aporte de las diferentes longitudes de ondas a la variación total, para dos componentes. De color

azul se muestran los aportes de la primera componente y en color rojo, de la segunda componente.

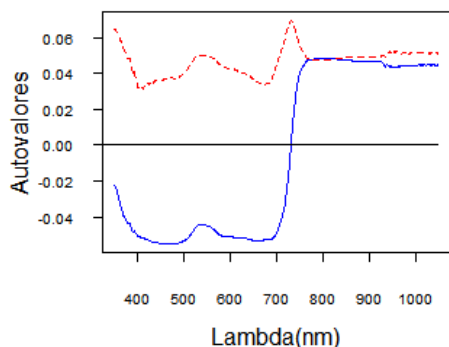


Fig. 3 Autovalores contra lambda. PCA por estado fenológico de la variedad de arroz FCA 616FL

En la tabla 2, se presentan las longitudes de las ondas favorecidas por el PCA para distinguir entre los diferentes días de crecimiento de la variedad de arroz IDIAP 5205.

TABLE 2
DATOS DEL PCA PARA DIFERENTES DÍAS DE SIEMBRA EN LA VARIEDAD DE ARROZ IDIAP 5205

Componente	Lambda(nm)
PC1	820.68
PC1	479.53
PC2	731.28

En la figura 4, se muestra la gráfica *Biplot* del PCA. Los colores diferencian los días de crecimiento y se indican las principales direcciones de las componentes.

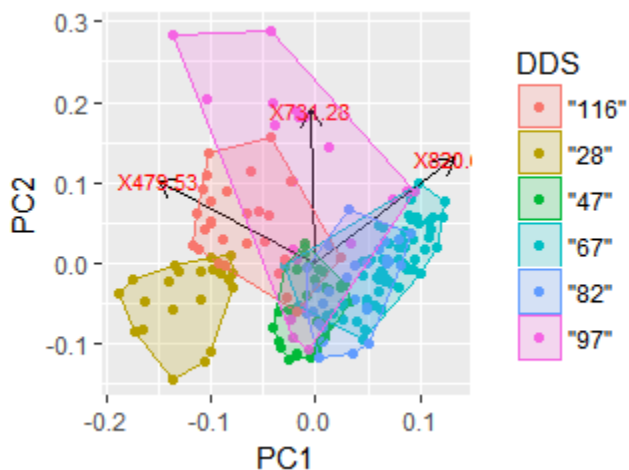


Fig. 4 Biplot. Según días de siembra de la variedad de arroz IDIAP 5205

Se observa en la figura 4, que no hay una separación clara entre los grupos ya que en el tiempo el desplazamiento se da en una dirección y luego retorna.

C. Estimación de área foliar

En la tabla 3, se muestran los datos de la estimación de área foliar

TABLE 3
DATOS DE MEDICIONES DEL ÍNDICE DE ÁREA FORLIAR EN LA VARIEDAD DE ARROZ IDIAP 5205

Tiempo desde la siembra	LAI	σ
47	4.68	1.50
67	7.16	2.18
82	7.09	1.98
97	9.25	2.45

En la figura 5, se muestra el comportamiento del LAI promedio.

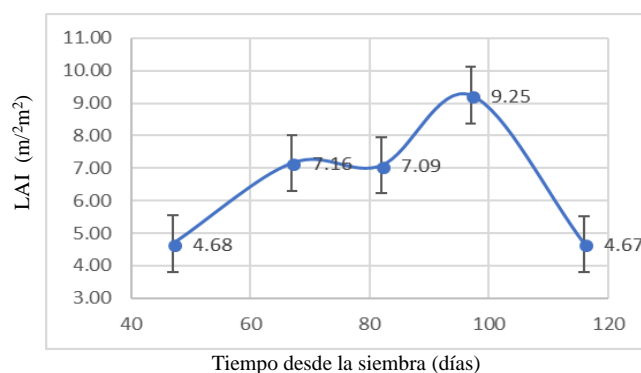


Fig. 5 Serie de tiempo del LAI de la variedad IDIAP 52-05 a diferentes días de siembra

D. Regresión

Se realizó una regresión múltiple (MLS), utilizando las longitudes obtenidas del análisis de componentes principales. Así el índice de área foliar se puede determinar con las reflectancias de las longitudes de onda 820.68 nm y 479.53.

$$LAI = 0.7633 * R_{479.53} + 0.11731 * R_{820.68} \quad (1)$$

En la tabla 4, se muestra el resumen del resultado de aplicar la ecuación (1) a datos no utilizados en la regresión.

TABLE 4
RESULTADO DEL MODELO

Método	Calibración (n=53)	
	RMSE	r
MLS	3.04	0.94

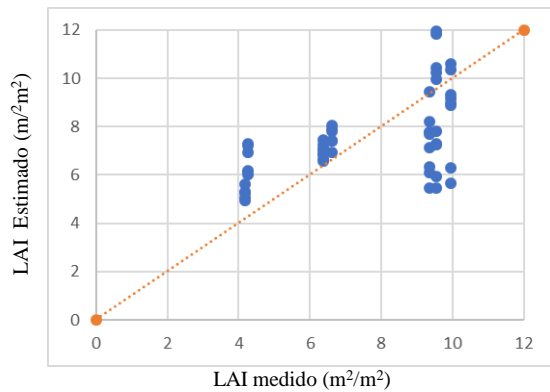


Fig. 6 Serie de tiempo del LAI de la variedad IDIAP 52-05 a diferentes días de siembra

E. Cálculo de NDVI y MTVI2

Se realizó el cálculo de NDVI con la ecuación (2) utilizando la longitud NIR de mayor variación resultado de análisis PCA a 820.68 nm y variaciones del rojo entre 601.52 nm y 749 nm. Como se muestra en la figura 7, el rojo a 650 nm resultó con mayor índice de correlación lineal $R^2 = 0.7547$.

$$NDVI = \frac{(\rho_{820} - \rho_{650})}{(\rho_{820} + \rho_{650})} \quad (2)$$

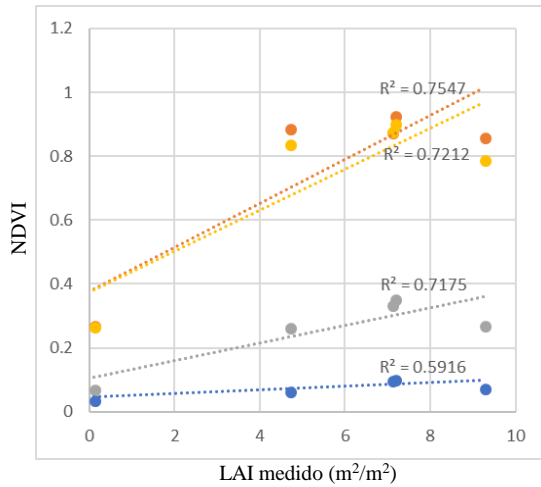


Fig. 7. Cálculo de NDVI utilizando la reflectancia a NIR a 820 nm y variaciones de rojo a 601.52 nm en color amarillo, 650 nm en color naranja, 731 nm en color gris y 749 nm en color azul.

En la ecuación (3) se muestra el ajuste lineal.

$$LAI = 14.556 * NDVI_{650-820} - 5.489 \quad (3)$$

En la tabla 5, se resume el resultado del error y índice de correlación para regresión lineal con el NDVI.

TABLE 5
RESULTADO DEL MODELO

Método	Calibración (n=53)	
	RMSE	r
LINEAL	1.78	0.7547

En la figura 8, se puede observar que el NDVI tiene un máximo que indica una saturación del índice espectral cercano a un LAI de 7 y un ajuste cuadrático con el NDVI. Muestra un mayor grado de ajuste con un $R^2 = 0.98$

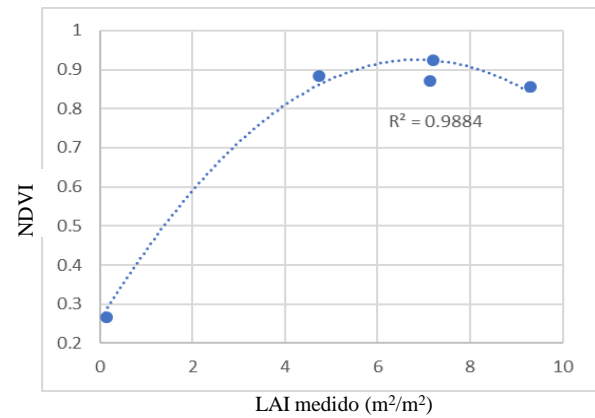


Fig. 8 NDVI calculado a 820 nm y 650 nm, con los valores promedio de las etapas fenológicas.

En la figura 9, puede observar de manera más clara la saturación del índice NDVI en el tiempo. Después de los 60 días que corresponde finalización de la etapa vegetativa.

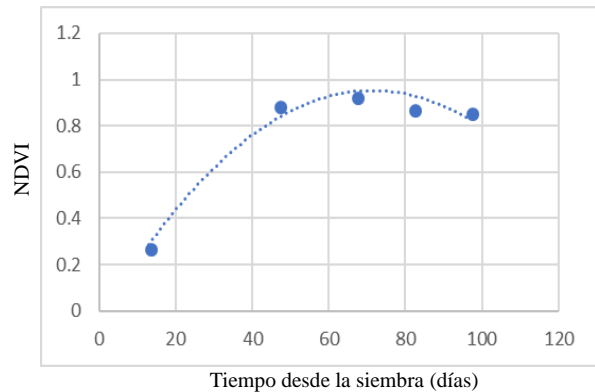


Fig. 9. NDVI calculado a 820 nm y 650 nm, con respecto los días siembra con los valores promedio de las etapas fenológicas.

Se calculó el índice MTVI2, según la ecuación (4), el cual muestra un ajuste alto en las medidas en cada etapa fenológica.

$$MTVI2 = \frac{1.5[1.2(\rho_{800} - \rho_{550}) - 2.5(\rho_{670} - \rho_{550})]}{\sqrt{(2\rho_{800} + 1)^2 - (6\rho_{800} - 5\sqrt{\rho_{670}}) - 0.5}} \quad (4)$$

En la ecuación (5) se muestra la ecuación con un mejor ajuste exponencial y en la tabla 6, un resumen del modelo.

$$LAI = 0.0022e^{8.4316 \cdot MTVI2} \quad (5)$$

TABLE 6
RESULTADO DEL MODELO

Método	Calibración (n=53)	
	RMSE	r
exponencial	1.93	0.9714

En la figura 10, se muestra el comportamiento del índice MTVI2 el cual también indica un nivel de saturación cerca del valor 8 del índice de área foliar.

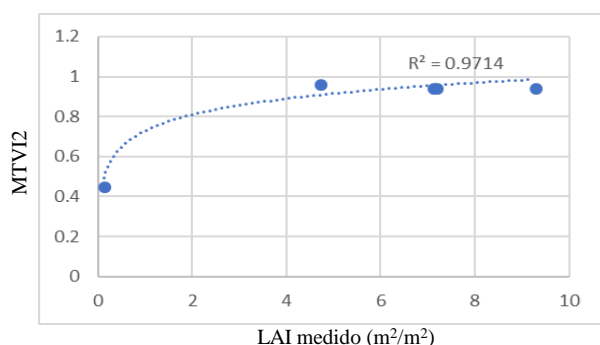


Fig. 10. Comportamiento del índice MTVI2 con respecto índice de área foliar con los valores promedio de las etapas fenológicas.

IV. DISCUSIÓN

La firma espectral a inicio del cultivo como se observa en la gráfica 1, a los 13 días desde la siembra se ve afectada más por la influencia de la reflectancia del suelo.

En la fase vegetativa las firmas se ven afectadas por el cambio de área foliar, crecimiento de las hojas en número y tamaño, a menor área foliar hay mayor interferencia del suelo descubierto en la firma [13]. La variación en el rango de infrarrojo cercano puede deberse al contenido de nitrógeno o contenido de agua.

En la gráfica 2 se observa que la reflectancia en general es mayor en la fase de maduración que en las otras fases, lo cual coincide con los resultados de [14], en pruebas realizadas a la variedad de arroz Kongyu proveniente de China. La presencia de la panícula aumenta la reflectancia en el rango de infrarrojo cercano, lo cual concuerda con los resultados de [10] para la variedad de arroz japónica. Se observa un decaimiento de la reflectancia en la últimas etapas del cultivo, esta debido al disminución de pérdida de cobertura foliar verde, hojas que han perdido agua.

En el análisis de PCA Las longitudes de ondas que caracterizan las diferencias en el tiempo están en el rango

visible y en el infrarrojo cercano. El mayor cambio en el tiempo de observa en el infrarrojo.

También se puede apreciar en el gráfico de PCA que no se muestra una separación en los grupos formados por los diferentes días de siembra, pero estos tienen un comportamiento de vaivén.

En la figura 6, se observa que el resultado de la regresión muestra mayor inexactitud en los 47 días, debido probablemente a la poca variación de la reflectancia a los 479.53 con respecto a la fase siguiente del arroz a los 67. Según [16] 479.53 nm en una longitud correlacionada a la absorción de clorofila por lo que tiene una probable sensibilidad a esta variable.

Al realizar la comparación con el NDVI se estimó el mejor NDVI considerando el NIR de mayor variación en las etapas fenológicas y para determinar la longitud se aplicó una variación que en la figura 7, muestra una mejora cuando se disminuye desde 749 nm a 600 nm pero, no muestra una mejoría significativa desde los 650 nm.

Los resultados de la figura 8, corresponden a lo publicado anteriormente en [15] en cuanto a la correlación del NDVI y el LAI.

Se realiza la comparación con el índice MTVI2 que según [6] ha mostrado alto índice de correlación con el LAI para maíz, soya y trigo y menos sensibilidad a las variaciones de clorofila, en la figura 10 puede corroborarse este mismo comportamiento para el cultivo de arroz.

V. CONCLUSIONES

Por los resultados mostrados en la regresión se puede concluir que es razonable la aproximación lineal del LAI utilizando una regresión lineal con la reflectancia de 479.53 nm y 820.63 nm, excepto para la región vegetativa anterior a los 47 días, para la cual sería necesaria otra aproximación con otra variable. En comparación a la regresión con el índice espectral NDVI, el modelo obtenido tiene mejor ajuste, mientras que con respecto al MTVI2 tiene un ajuste similar.

Como trabajo posterior tendría que determinarse la sensibilidad del modelo obtenido en este trabajo con respecto al contenido de clorofila.

AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos son para la Secretaría Nacional de Ciencias y Tecnología de Panamá (Senacyt), por el financiamiento del proyecto de investigación.

Igualmente agradecemos al sistema nacional de investigación de Panamá por el apoyo a uno de los autores del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Emilio Chuvieco. (2010). "Teledetección Ambiental". Edición 2010, Editorial Ariel, pag 18,46,55.
- [2] Liang Liang, Liping Di, Lianpeng Zhang, Meixia Deng, Zhihao Qin, Shuhe Zhao, Hui Lin. (2015). "Estimation of crop LAI using

- hyperspectral vegetation indices and a hybrid inversion method*". Remote Sens. Environ. 165 (2015) 123–134.
- [3] Kross, Angela; Heather McNairn, David Lapen, Mark Sunohara, Catherine Champagne. (2015) "Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 34 (2015) 235–248.
- [4] X. Qiaoyun, Wenjiang. huang, Dong. liang, Pengfei. chen, Chaoyang Wu, Guijun. yang, Jingcheng Zhang, Linsheng. Huang, and Dongyan Zhang. "leaf area index estimation using vegetation indices derived from airborne hyperspectral images in winter wheat". IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, vol. 7, no. 8, august 2014.
- [5] Qiang Cao, Yuxin Miao, Jianning Shen, Weifeng Yu, Fei Yuan, Shanshan Cheng, Shanyu Huang, Hongye Wang, Wen Yang, Fengyan Liu. (2015). "Improving in-season estimation of rice yield potential and responsiveness to topdressing nitrogen application with Crop Circle active crop canopy sensor". Precision Agric, Edición 2015.
- [6] Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., Strachan, I.B., 2004. "Hyper-spectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture". Remote Sens. Environ. 90, 337–352.
- [7] Monsi M, Saeki T. "On the factor light in plant communities and its importance for matter production". Ann Bot 95:549–567.
- [8] Jarra, A.O. Degiovanny, V. Montoya R. (2010). "Índices fisiotécnicos, fases de crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. Producción Eco-eficiente del Arroz en América Latina". Tomo I. Pag 65-68.
- [9] Ross J. "The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands". Dr W Junk Publishers, The Hague. Editorial Springer Science & Business Media.
- [10] He, Jiaoyang; Yehui Qin, Caili Guo, Liyun Zhao, Xiang Zhou, Xia Yao, Tao, Cheng, Yongchao. Tian. (2016). "Monitoring leaf area index after heading stage using hyperspectral remote sensing data in rice". 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Pages: 6284 – 6287.
- [11] Fu-min Wang, Jing-feng Huang, Zhang-hua Lou. "A comparison of three methods for estimating leaf area index of paddy rice from optimal hyperspectral bands". Precision Agric (2011) 12:439–447.
- [12] R Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- [13] Yang, Chwen-Ming; Chen, Rong-Kuen. (2004). "Modeling Rice Growth with Hyperspectral Reflectance Data". Crop Science; Julio/Agosto 2004; 44, 4; ProQuest página 1283.
- [14] M. Gnyp, Y. Miao, F. Yuan, S. Ustin, K. Yu, Y. Yao, S. Huang, G. Bareth. "Hyperspectral canopy sensing of paddy rice aboveground biomass at different growth stages". Field Crops Research 155 (2014) 42–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.023>
- [15] Din. M, Zheng. W, Rashid. M, Wang. S, Shi. Z. "Evaluating Hyperspectral Vegetation Indices for Leaf Area Index Estimation of Oryza sativa L. at Diverse Phenological Stages". Frontier in Plant Science. doi: 10.3389/fpls.2017.00820.
- [16] Curran P.J. "Remote sensing of foliar chemistry. Remote Sensing of Environment, 30, 271-278.