

Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año **1. Datos generales del Proyecto**

Código del proyecto: CI 2961			
Título del proyecto: Sistema aéreo autónomo para el mapeo del contenido de nitrógeno de un cultivo usando microsensores espectrales			
Facultad o Instituto Académico: Facultad de Ingeniería, Ciencias Naturales y Exactas (Asociada)			
Departamento o Escuela: Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, EIDENAR, Departamento de Física			
Grupo (s) de investigación: Grupo de Investigación en Control Industrial, Grupo de Investigación en Percepción y Sistemas Inteligentes, Óptica cuántica, Grupo de Investigación Gestión Integral de Riego para el Desarrollo Agrícola y la Seguridad Alimentaria.			
Entidades: Universidad del Valle			
Palabras claves:			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado (h/semana)	Tiempo dedicado (h/semana)
Investigador Principal	Esteban Emilio Rosero García	8	8
Coinvestigadores	Eval Bladimir Bacca Cortés	3	3
	Efrain Solarte	3	3
	Carlos Augusto Galindez Jamioy	3	3
	Martha Constanza Daza	3	3
Otros participantes			
Estudiante de doctorado	Aldemar Reyes	20	20

¹ Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.

Estudiantes de maestrías	de	Pedro Luis Murillo	4	4
Estudiantes de pregrado	de	Ober Jeiber Perafan	10	10
		Ana María Hurtado	10	10
		Juan Camilo Quintero	20	20

2. Resumen ejecutivo:

El desarrollo de nuevas técnicas y tecnologías en agricultura ha permitido un mejoramiento substancial de la productividad del sector agroindustrial en cultivos de gran escala. Estas técnicas y tecnologías también pueden incrementar la competitividad y productividad de pequeños agricultores optimizando el rendimiento y maximizando la calidad de los productos. Colombia es un país de vocación fundamentalmente agrícola, con una necesidad real de mejorar la eficiencia y los índices de productividad para competir en los mercados nacionales e internacionales. Además de las nuevas tecnologías ligadas directamente a la agronomía, a la biología y la química, existen hoy técnicas ópticas y electrónicas que combinadas, permiten el seguimiento espacial y periódico de los cultivos, a través del sensado remoto, con el subsecuente beneficio de disponer de información confiable y en tiempo real que facilite la trazabilidad y el manejo adecuado de los sistemas productivos agrícolas.

Sin embargo, la aplicación de este tipo de nuevas técnicas es limitada por las condiciones geográficas del sector agrícola (alta nubosidad, tierras escarpadas, etc.) y la precaria situación socioeconómica en Colombia, que hacen que el sensado remoto satelital o aerotransportado tenga muchas limitaciones por su falta de disponibilidad real, alto costo y complejidad operativa. Una aplicación potencial del sensado remoto, que hasta el momento está sin desarrollar en la región, es la que utiliza en combinación microsensores espectrales y plataformas aéreas autónomos de baja altitud, con el objetivo de conformar programas preventivos bajo el concepto de agricultura de precisión, al detectar tensiones ambientales como deficiencias nutricionales; con ello, es posible diagnosticar a tiempo y asegurar la calidad y cantidad de la producción por área cultivada, independiente de la configuración geográfica de una zona.

Dado el desarrollo de los últimos años en microsensores óptico-electrónicos y plataformas aéreas autónomas, el propósito de este proyecto es desarrollar un sistema aéreo autónomo, integrado con microsensores espectrales, para mapear el contenido de nitrógeno de un cultivo específico, en condiciones experimentales.

Los resultados esperados de este proyecto son: una plataforma aérea autónoma integrada con microsensores espectrales para el monitoreo de un cultivo, un sistema de gestión y planificación de vuelo del sistema autónomo para la captura georreferenciada de datos del cultivo, la definición de bioindicadores espectrales de contenido de nitrógeno del cultivo y su correlación con parámetros propios del cultivo y una metodología para el procesamiento, análisis y presentación de información del comportamiento espectral sobre un área de cultivo definida.

En el desarrollo de este proyecto se vinculó un (1) estudiante de doctorado, cuatro (4) estudiantes de pregrado. Se están finalizando de preparar dos (2) artículos en revistas Q2, se presentaron dos (2) ponencias en eventos académicos y ya se han concluido dos (2) trabajos de pregrado.

Palabras clave: sistema aéreo autónomo, microsensores espectrales, contenido de nitrógeno.

3. Síntesis del proyecto:

Objetivo general:

Desarrollar un sistema aéreo autónomo, integrado con microsensores espectrales, para mapear el contenido de nitrógeno de un cultivo específico.

Objetivos Específicos:

- 1. Diseñar y construir un sistema aéreo autónomo, integrado con microsensores de medición de señales multi e hiperespectrales de bajo costo.**

Con la revisión del estado del arte de este tipo de aplicaciones se logró establecer que no hay una herramienta de software genérica para el control de vuelo de un dron. Por el contrario, se debe desarrollar particularmente y considerando las especificaciones del campo de acción. Por

esta razón, los requerimientos funcionales de la herramienta de software para este fin son los siguientes:

- a. El usuario debe configurar los sensores multi-espectrales.
- b. El usuario debe introducir los puntos de paso de la misión de medición.
- c. El usuario debe configurar otros sensores a emplear en la misión.
- d. El usuario debe poder observar la telemetría del dron a lo largo de la misión.
- e. El usuario debe poder iniciar, pausar y reanudar la misión.
- f. El usuario debe poder descargar los datos tomados en la misión, grabarlos en una base de datos y exportarlos en un formato compatible para su análisis.

Estos requerimientos, así como su diagrama conceptual, casos de uso real, diagramas de secuencia, y diagramas de clase se encuentran reportados en la documentación de desarrollo. Esto se muestra en las Figuras 1 y 2. Adicionalmente, el dron debe cargar un sistema de desarrollo Raspberry PI con el fin de manejar los sensores multi-espectrales, su configuración y calibración.



Figura 1. Diagrama conceptual del aplicativo.

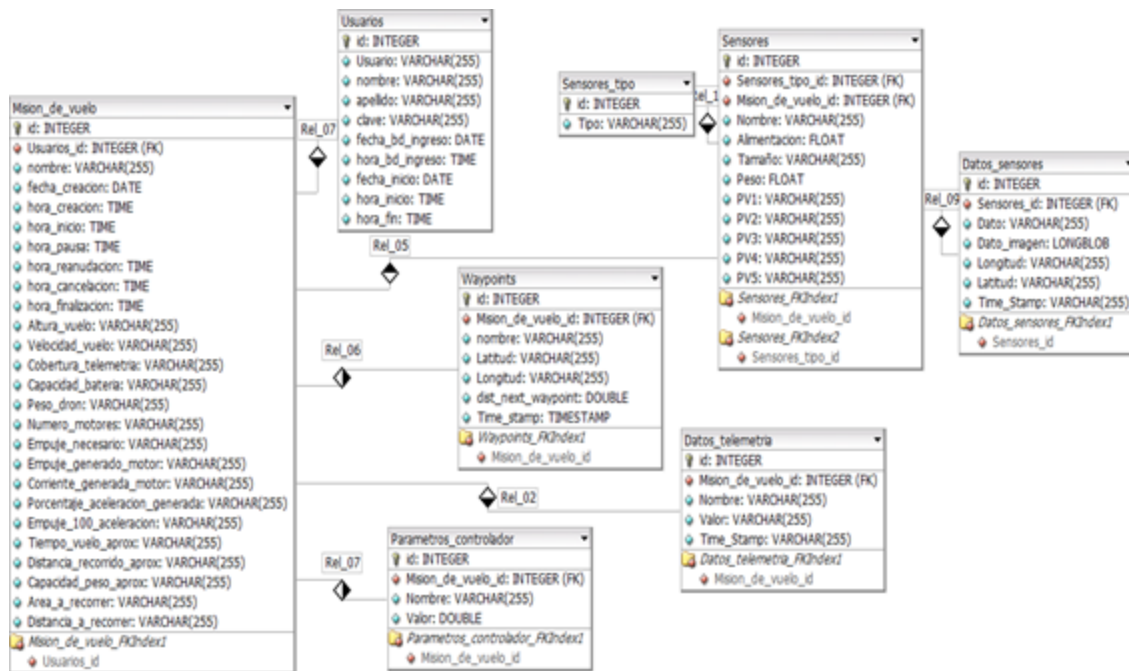


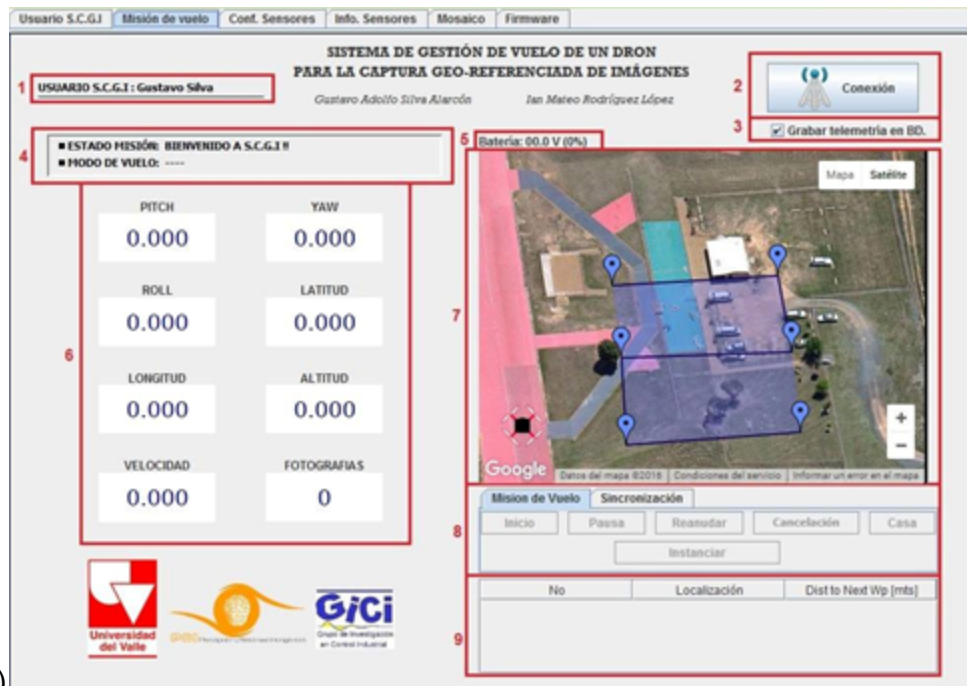
Figura 2. Modelo relacional del aplicativo.

2. Desarrollar el sistema de gestión de información y planificación de vuelo de la plataforma aérea para el registro de datos georreferenciados.

La implementación de estos requerimientos funcionales conllevó a una serie de interfaces de usuario que se muestran en la Figura 3, que corresponden a que primero el usuario realice un inicio de sesión, segundo que el usuario realice una configuración de sensores y carga de los puntos de paso, tercero que el usuario defina un esquema de comunicación para el envío continuo de datos de telemetría, y por último el envío de datos de telemetría de la misión.



a)



b)

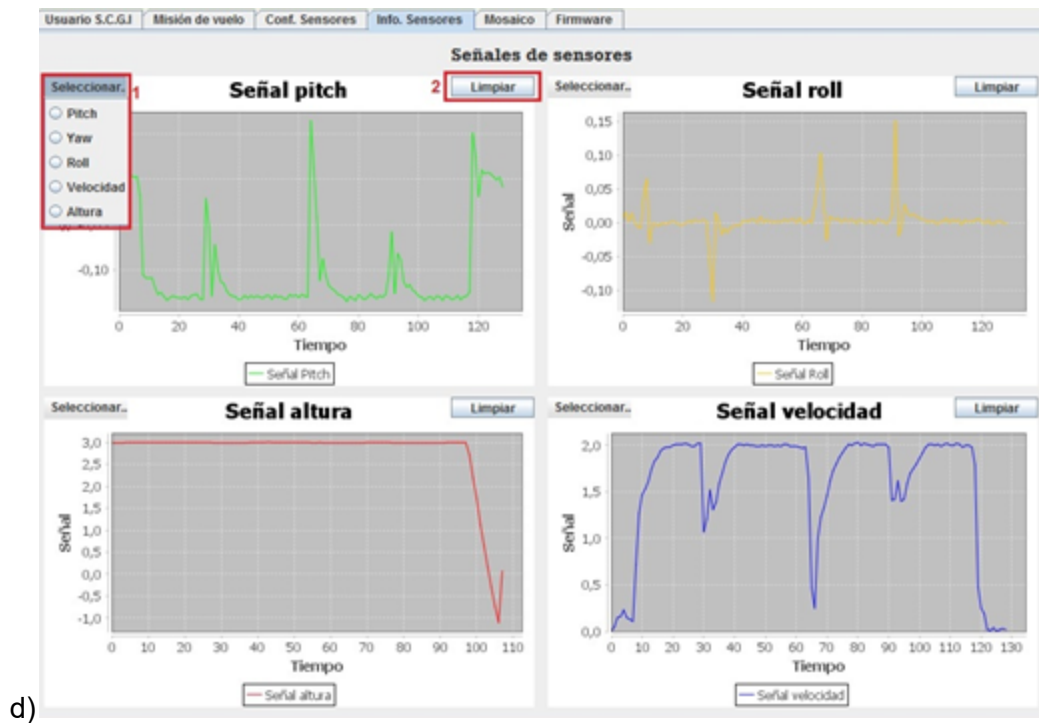
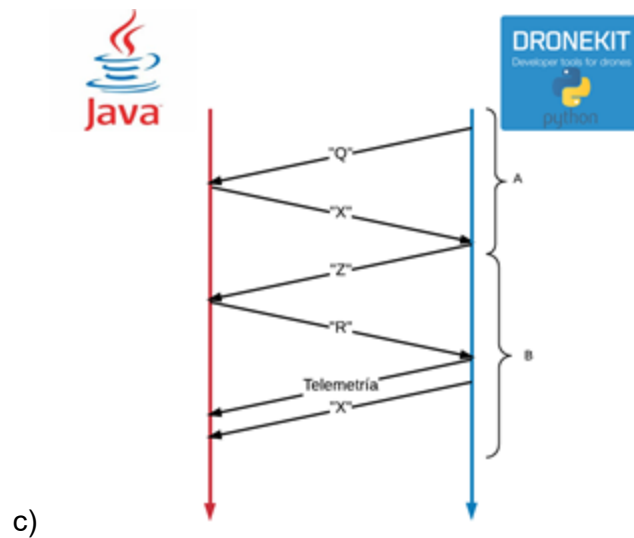


Figura 3. a) Login e inicio de sesión. b) Configuración de sensores y carga de los puntos de paso. c) Esquema de comunicación para el envío continuo de datos de telemetría. d) Datos de telemetría de la misión.

3. Diseñar el área de cultivo en condiciones de déficit de fertilización nitrogenada en la Parcela Experimental Agrícola de la Universidad del Valle para validación del sistema aéreo autónomo integrado.

El arreglo de las unidades experimentales (UE) se realizó con un diseño en bloques completos al azar, con un factor (fuente nitrogenada), 4 tratamientos (dosis) y 5 repeticiones, para un total de 20 UE de 33 m² cada una, sembradas con la variedad de caña de azúcar CC 01-1940. La distribución de los bloques se realizó de acuerdo con un mapa de variabilidad del contenido de MO, como se muestra en la Figura 4; por su parte, la distribución de los tratamientos se realizó de forma aleatoria dentro de cada bloque, como se muestra en la Figura 5.



Figura 4. Distribución de los bloques en la parcela experimental (Fuente: Reyes, 2018) .

La fuente nitrogenada recomendada para aplicaciones con fertirriego es la solución UAN-32, un fertilizante líquido que contiene N en tres diferentes estados: ureico, amoniacal y nítrico, que lo convierte en una solución de alta eficiencia y asimilación para el cultivo. Las dosis de la solución UAN-32 aplicadas en los tratamientos, se determinaron a partir de la dosis comercial recomendada por CENICAÑA, y fueron de 0, 80, 160 y 240 unidades de N.

De acuerdo a la Figura 6, las UE se conformaron de cuatro surcos, donde se aplicaron los tratamientos, con sus respectivos surcos de borde, los cuales tenían como objetivo disminuir el

efecto de borde que causa la aplicación de las diferentes tasas de fertilizante nitrogenado entre las UE.

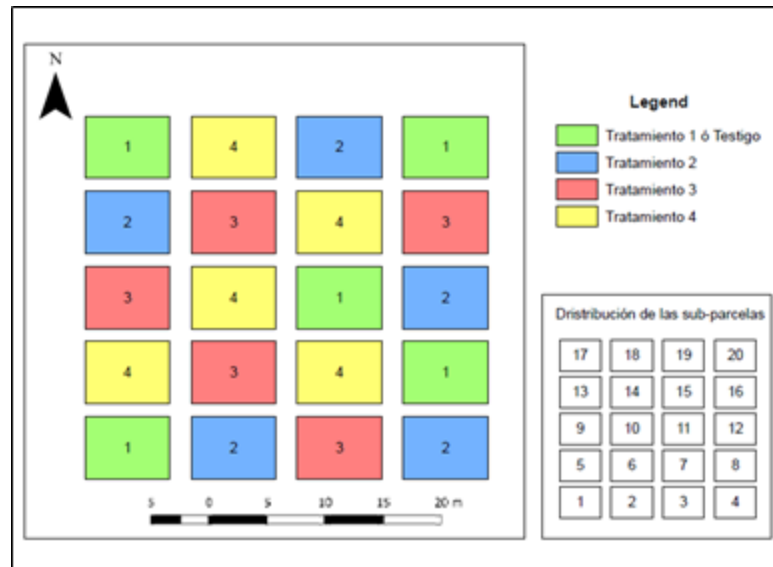


Figura 5. Distribución de los tratamientos en la parcela experimental (Fuente: Reyes, 2018).

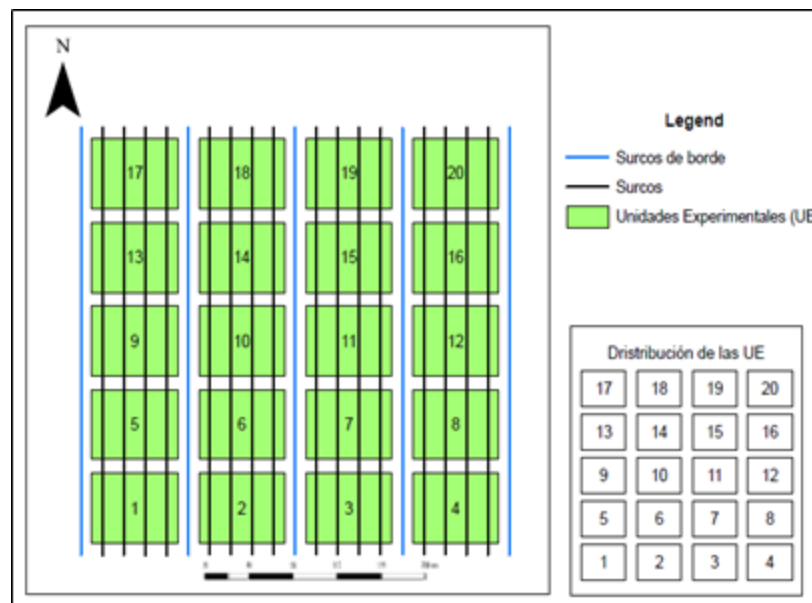


Figura 6. Distribución de los surcos de siembra.

Las variables de respuesta esperadas en el experimento son: firmas de reflectancia espectral a nivel de dosel, y % de N foliar determinado en laboratorio por Kjeldahl.

Las actividades de fertirrigación para los tratamientos establecidos se programaron teniendo en cuenta los requerimientos nutricionales del cultivo durante su desarrollo vegetativo (Figura 7).

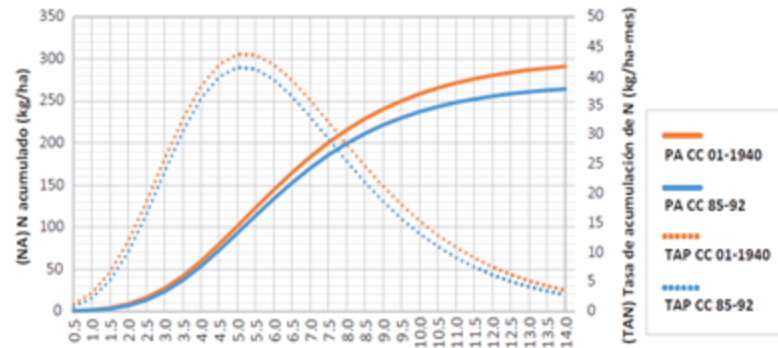


Figura 7. Requerimientos de N en el ciclo vegetativo de la variedad CC-011940. Fuente: CENICAÑA, 2018.

El control del riego se llevó a cabo utilizando curvas de retención de humedad, ya establecidas en investigaciones anteriores, y el monitoreo constante de la humedad del suelo con TDR (Time Domain Reflectometry). Esto se hizo con el fin de conocer la humedad inicial del suelo, y verificar que con la lámina aplicada no excediera la humedad volumétrica a capacidad de campo del suelo definida en 45,8%.

4. Desarrollar una metodología para el procesamiento y el análisis de la información espectral que permita validar los bioindicadores del cultivo en correlación con parámetros propios del cultivo y generación de mapas.

Análisis estadístico

Se empleó un análisis de varianza por contraste ortogonal, el cual permitió establecer si se presentaban diferencias significativas entre las UE a nivel del factor de variación, es decir, la dosis de solución UAN-32 aplicada, o a nivel de bloque.

El anova permitió contrastar la hipótesis nula, , frente a la hipótesis alternativa que establece que por lo menos una de las poblaciones difiere de las demás en cuanto a su valor esperado. Lo anterior se puede expresar de la siguiente forma:

Ecuación 2: Hipótesis Nula $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$

Ecuación 3: Hipótesis Alternativa $H_1: \mu_1 \neq \mu_2 = \mu_3 = \mu_4; \mu_1 = \mu_2 \neq \mu_3 = \mu_4 \dots$

en donde se puede observar que la hipótesis nula establece que la fertilización no proporcionará diferencias significativas en el contenido de N foliar; mientras que, la hipótesis alternativa dice que por lo menos uno de los tratamientos presentará diferencias. Por otra parte, es importante mencionar que el análisis estadístico compara las varianzas (Avellana, 2005). Por lo anterior que se requiere que los datos que se van a analizar cumplan con 3 supuestos:

- Independencia: las muestras son independientes.
- Normalidad: las poblaciones de datos tienen distribuciones de probabilidad normales.
- Homocedasticidad: las poblaciones tienen todas igual varianza.

El anova se basa en la comparación de la variabilidad media global (SCT) que hay entre los tratamientos o inter-grupos (SCE), junto con la que hay dentro de cada uno de estos o intra-grupos (SCD). En la primera se cuantifica la dispersión de las medias de los tratamientos con respecto a la media global; mientras que la segunda se lo hace con dispersión de los valores de cada tratamiento con respecto a sus correspondientes medias (Avellana, 2005).

El desarrollo del test anova se realizó mediante el empleo del software R utilizando un nivel de significancia del cinco por ciento ($\alpha=0.05$). El cumplimiento de los supuestos se verificó utilizando los residuales del modelo.

Tratamiento de la información espectral

Se emplearon tres metodologías para la estimación del N foliar a partir de la información espectral. En la primera metodología, se aplicó una regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS) sobre la firma espectral promedio o espectro promedio por UE, obtenido a partir de las firmas espectrales capturadas en campo (PLS-R). En la segunda, se utilizó el mismo método de regresión, pero aplicado sobre la primera derivada de la reflectancia del espectro promedio por UE (PLS-FDR). Finalmente, la tercera empleó la PLS sobre 15 índices de vegetación,

determinados a partir de los espectros de reflectancia, que guardan estrecha relación con el contenido de N foliar (PLS-IV).

El rango espectral utilizado estuvo sujeto a la herramienta de medición, que para el caso fue un microespectrómetro del rango visible (VIS 335-820) de Ocean Optics Inc, y a un ajuste realizado para eliminar el ruido sobre el extremo cercano al UV. Este se originaba por las condiciones de funcionamiento del sensor y porque el panel de referencia utilizado (spectralon) aseguraba una reflectancia mayor o igual al 99% solo en un rango de 400 a 1500 nm. Finalmente, se obtuvieron firmas espectrales de reflectancia entre 450 a 820 nm. La firma espectral de la caña de azúcar se muestra en la Figura 8.

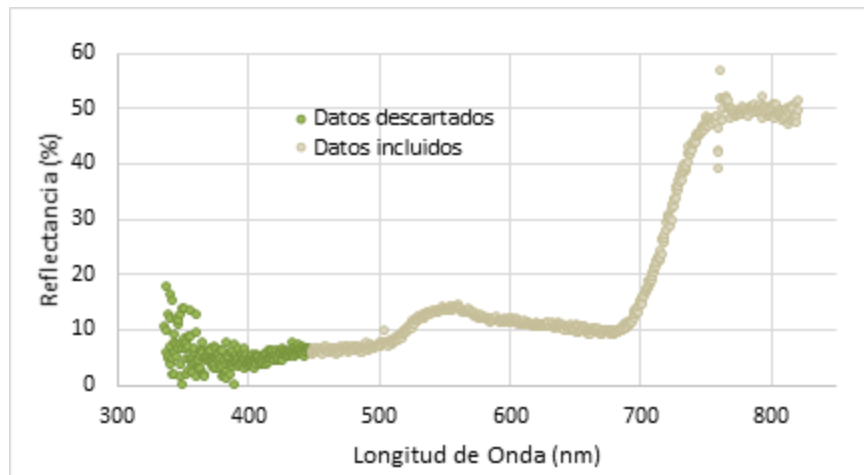


Figura 8. Firma espectral de la caña de azúcar (CC-011940).

PLS-R

Debido a que la configuración de la toma y guardado de los datos permitía obtener 10 firmas de reflectancia espectral por surco, y a que la configuración de siembra daba 4 surcos por UE, para un total de 800 espectros por campaña, fue necesario sacar un promedio de las firmas por cada UE. Con el espectro promedio y los correspondientes valores de contenido de N foliar determinados en laboratorio por cada UE, se aplicó la regresión PLS en el software R.

PLS-FDR

Con las firmas de reflectancia espectral promedio por cada UE, se procedió a realizar un suavizado de la información espectral mediante el filtro de Savitzky–Golay; este permite corregir off-set, es decir, logra la disminución de los ruidos asociados a las variaciones de intensidad de

la radiación solar, alta nubosidad, cambios en el ángulo de incidencia y afectaciones por el suelo. Este procedimiento, se repitió para cada una de las 6 campañas de medición. Las plantillas creadas, se emplearon para realizar la regresión PLS en el software R.

PLS-IV

En esta metodología, se calcularon 15 IV (Tabla 1) para cada una de las 800 firmas de reflectancia espectral por campaña. Luego, se procedió a sacar la media de cada índice en las 20 UE y construir la regresión PLS con N foliar.

Tabla 1. Índices de vegetación empleados en el estudio.

Nombre del índice	Abreviatura	Fórmula
Chlorophyll Index RedEdge 710	Cirededge710	$((750 \text{ nm}) / (710 \text{ nm}) - 1)$
Normalized Difference 750/550 Green NDVI	NDVig	$((750 \text{ nm} - 550 \text{ nm}) / (750 \text{ nm} + 550 \text{ nm}))$
Circular Vegetation Index	CVI	$\text{NIR} * (\text{RED} / \text{GREEN} 2)$
Canopy Chlorophyll Content Index	CCCI	$((\text{NIR} - \text{Rededge}) / (\text{NIR} + \text{Rededge})) / ((\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}))$
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$((\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}))$
Family NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (NIR By Rededge)	NDVIRE	$((\text{Rededge} - \text{RED}) / (\text{Rededge} + \text{RED}))$
Family NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (R By Rededge)	NDRE	$((\text{NIR} - \text{Rededge}) / (\text{NIR} + \text{Rededge}))$
Green Normalized Difference Vegetation Index	GNDVI	$((\text{NIR} - \text{GREEN}) / (\text{NIR} + \text{GREEN}))$
Family GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) (NIR By Rededge)	GNDRE	$((\text{Rededge} - \text{GREEN}) / (\text{Rededge} + \text{GREEN}))$
Family BNDVI (Blue Normalized Difference Vegetation Index) (NIR By Rededge)	BNDRE	$((\text{Rededge} - \text{BLUE}) / (\text{Rededge} + \text{BLUE}))$
Family EVI (Enhanced Vegetation Index) (NIR By Rededge)	EVIRE1	$2.5 * ((\text{Rededge} - \text{RED}) / (\text{Rededge} + 6 * \text{RED} - 7.5 * \text{BLUE} + 1))$
Family CVI Circular Vegetation Index (R By Rededge)	CVIRE2	$(\text{NIR} * \text{Rededge}) / (\text{GREEN} 2)$
Chlorophyll Index Green	CIG	$(\text{NIR}) / (\text{GREEN} - 1)$
Family CIG (Chlorophyll Index Green) (NIR By Rededge)	CIGRE	$(\text{Rededge}) / (\text{GREEN} - 1)$
Family ENDVI (Enhanced Normalized Difference Vegetation Index) (NIR by Rededge)	ENDRE	$((\text{Rededge} + \text{GREEN}) - (2 * \text{BLUE})) / (\text{Rededge} + \text{GREEN}) + (2 * \text{BLUE})$

NIR = 820 nm; RED = 668 nm; BLUE = 475 nm; GREEN = 560 nm; Rededge = 717 nm

En todas las metodologías fue necesario seleccionar el mejor modelo para la predicción de la variable de respuesta, en este proceso se tuvieron en cuenta los parámetros utilizados por Marabel & Álvarez (2014), Li *et al.* (2016) y Steidle *et al.* (2017), quienes indican que para que un modelo sea sólido debe tener un número bajo de componentes, el cual se escoge teniendo en cuenta el error de predicción de la validación cruzada, que para este caso es del tipo Leave-One-Out (LOO), y el coeficiente de determinación (R^2). Adicionalmente, para evaluar el modelo escogido y comparar entre campañas se determinaron el error cuadrado medio (ECM), la raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSEP), y la relación entre la desviación estándar y el RMSEP (RPD).

En las tres metodologías utilizadas para estimar el contenido de N foliar se identificaron las longitudes de onda y los IV más influyentes. Lo anterior se realizó con el fin de evaluar la importancia relativa de las variables independientes en la regresión de PLS, mediante el cálculo de la importancia de la variable en las puntuaciones de proyección (VIP). La magnitud de las

puntuaciones VIP indica la contribución de cada longitud de onda o IV, al valor del contenido de N foliar estimado por el modelo.

De acuerdo con la información reportada por Steidle *et al.* (2017), las longitudes o IV con valores de las puntuaciones VIP mayores a 1 son altamente influyentes para la labor de predicción del modelo PLS; mientras que, las correspondientes a valores entre 0,8 y 1 son moderadamente influyentes. Las longitudes de onda o IV con VIP menores que 0,8 son insignificantes en la predicción.

Finalizado el procesamiento y análisis de la información espectral, esta se especializó y se generaron mapas (Figuras 9), mediante una interpolación IDW en el software libre QGIS. Esta interpolación permite mostrar de forma visual que al aplicar la metodología PLS-FDR, se conservan las tendencias espaciales del contenido de N foliar encontradas con los datos medidos en el laboratorio. Lo anterior, ratifica que el contenido de N foliar puede estimarse mediante la captura de información espectral a nivel de dosel, utilizando el análisis de regresión PLS-FDR y la posibilidad de realizar análisis espaciales en tiempo real.

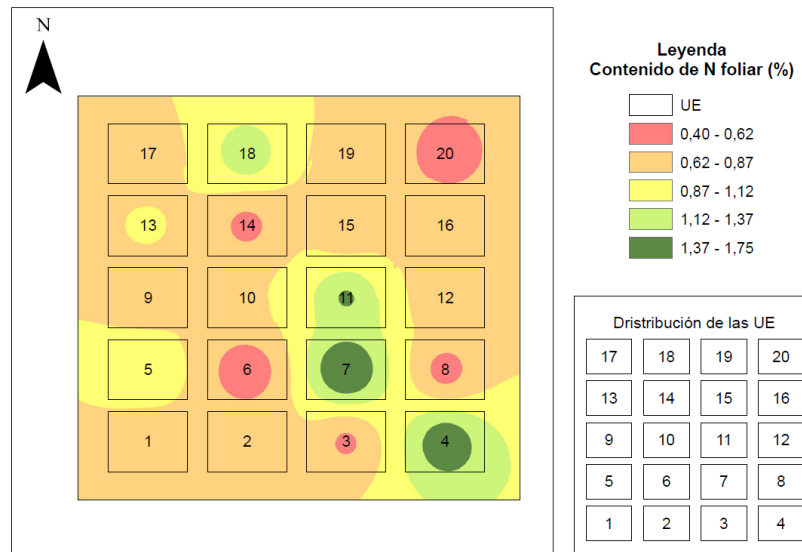


Figura 9. Contenido de N foliar estimado a los 210 DDS mediante PLS-FDR.

5. Definir los bioindicadores espectrales apropiados para la supervisión del área de cultivo experimental.

En las tres metodologías utilizadas para estimar el contenido de N foliar se identificaron las longitudes de onda y los IV más influyentes. Lo anterior se realizó con el fin de evaluar la

importancia relativa de las variables independientes en la regresión de PLS, mediante el cálculo de la importancia de la variable en las puntuaciones de proyección (VIP). La magnitud de las puntuaciones VIP indica la contribución de cada longitud de onda o IV, al valor del contenido de N foliar estimado por el modelo.

De acuerdo con la información reportada por Steidle *et al.* (2017), las longitudes o IV con valores de las puntuaciones VIP mayores a 1 son altamente influyentes para la labor de predicción del modelo PLS; mientras que, las correspondientes a valores entre 0,8 y 1 son moderadamente influyentes. Las longitudes de onda o IV con VIP menores que 0,8 son insignificantes en la predicción.

En forma general, el cumplimiento de los objetivos se resumen en la siguiente tabla:

Objetivo	Alcance
Objetivo 1: Diseñar y construir un sistema aéreo autónomo, integrado con microsensores de medición de señales multi e hiperespectrales de bajo costo.	100
Objetivo 2: Desarrollar el sistema de gestión de información y planificación de vuelo de la plataforma aérea para el registro de datos georreferenciados.	90*
Objetivo 3: Diseñar el área de cultivo en condiciones de déficit de fertilización nitrogenada en la Parcela Experimental Agrícola de la Universidad del Valle para validación del sistema aéreo autónomo integrado.	100
Objetivo 4: Desarrollar una metodología para el procesamiento y el análisis de la información espectral que permita validar los bioindicadores del cultivo en correlación con parámetros propios del cultivo y generación de mapas.	100
Objetivo 5: Definir los bioindicadores espectrales apropiados para la supervisión del área de cultivo experimental.	100

* Este objetivo se ha completado en un 90%. Se está finalizando la puesta a punto del sistema de gestión de información de la plataforma aérea.

Metodología

La Figura 10 muestra el protocolo de mediciones realizadas en campo y la Figura 11 muestra el tratamiento de los datos recogidos en campo.

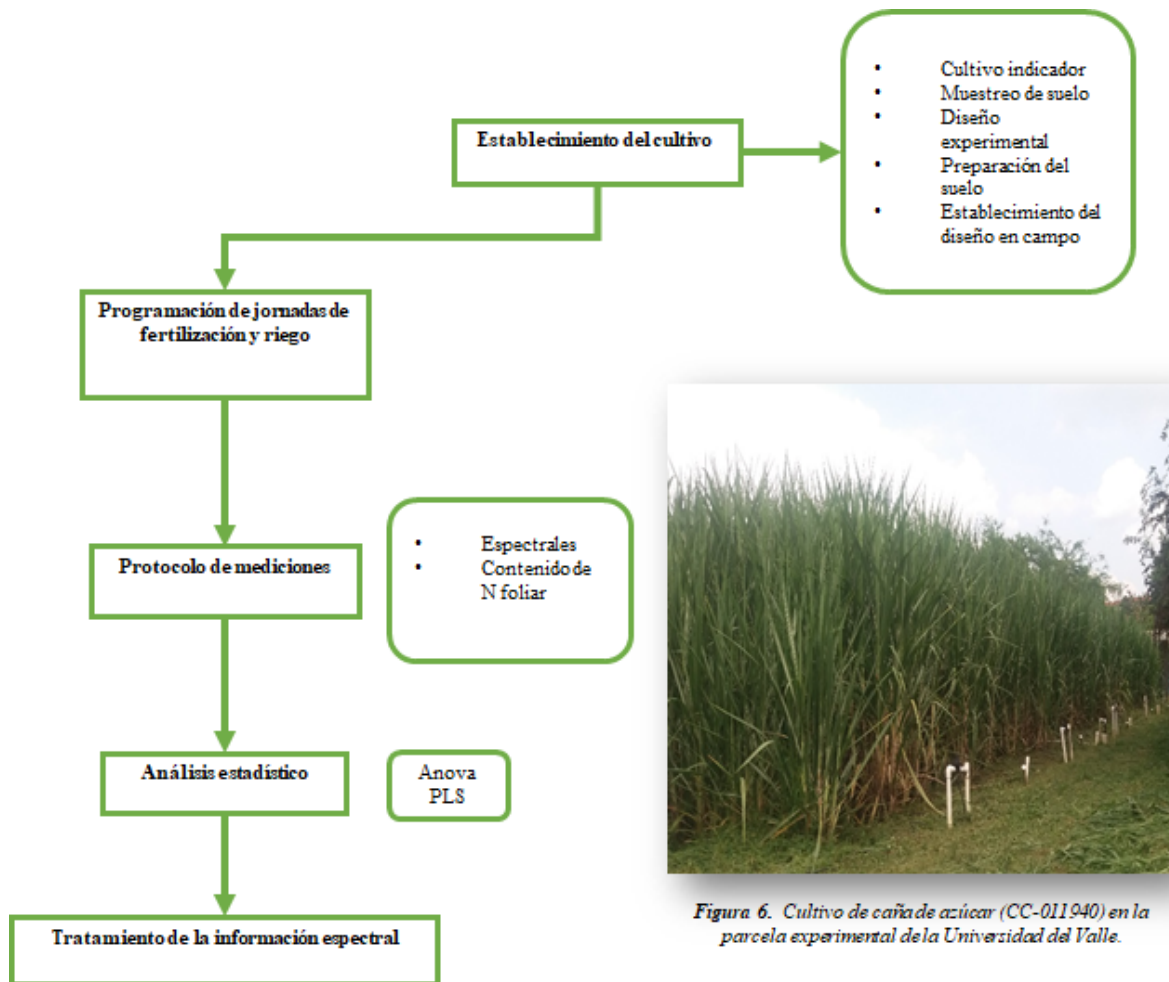


Figura 6. Cultivo de caña de azúcar (CC-011940) en la parcela experimental de la Universidad del Valle.

Figura 10. Protocolo de mediciones realizados en campo.

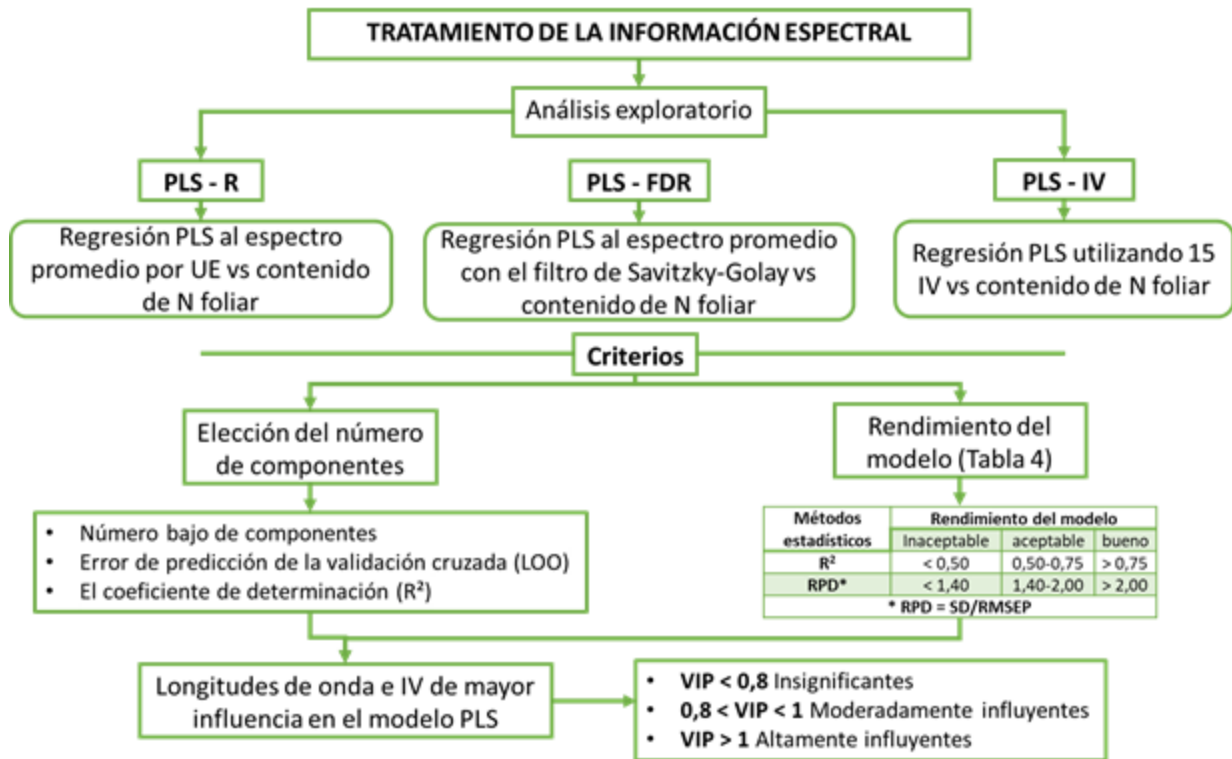


Figura 11. Tratamiento de datos.

Resultados obtenidos

Los resultados generales de este estudio mostraron que el contenido de N foliar en caña de azúcar (CC-011940), se puede estimar de forma precisa a partir de datos de reflectancia difusa del dosel del cultivo y el método de regresión por mínimos cuadrados parciales. Los mejores estadísticos del estudio fueron a los 210 DDS con el método PLS-FDR, pues se presentaron los valores más altos de R^2 (0.978) y RPD (3.721), y los valores más bajos de ECM (0.015) y RMSEP (0.124).

Es importante mencionar que los IV que mostraron alta influencia en cada campaña de medición, están estrechamente relacionados con las regiones del espectro que mostraron alta influencia en las metodologías PLS-R y PLS-FDR (510-595 nm, 610-645 nm, 695-710 nm y 710-770 nm) para la estimación del contenido de N en tejido foliar. Estas bandas espectrales

concuerdan con los resultados reportados en otras investigaciones para determinación de clorofila y N en diferentes cultivos agrícolas (Murillo & Carbonell, 2012; Li *et al.*, 2016; Schlemmer *et al.*, 2013; Abdel-Rahman *et al.*, 2010).

Lo anterior, abre la posibilidad de crear IV que utilicen longitudes de onda sensibles a las variaciones de N foliar en las diferentes etapas de desarrollo vegetativo de la caña de azúcar, pues el estudio demostró que la región azul, que tiene poca participación en los IV más utilizados en la agricultura, presentó alta influencia en la determinación del N foliar en todas las campañas de estudio aplicando las metodologías PLS-R y PLS-FDR; mientras que, las regiones como el verde, rojo y el NIR, cobraron importancia en determinados periodos de desarrollo. En este sentido, se debe tener en cuenta que, para estimar el contenido de N foliar en caña de azúcar mediante técnicas ópticas, es importante conocer el estado de desarrollo del cultivo, pues las zonas de alta influencia de las firmas espectrales de vegetación, variaron conforme la planta se desarrollaba.

Finalmente, de las tres metodologías implementadas para la estimación del N en el tejido foliar, PLS-FDR es la que presentó mejores resultados en el RPD, y los valores más bajos en los errores estimados en la mayoría de las campañas de medición; no obstante, los mejores R^2 en 5 de las 6 campañas, se presentaron con el método PLS-IV.

Principales conclusiones y/o recomendaciones

El estudio temporal del cultivo y el cálculo de las puntuaciones de importancia de la variable en la proyección (VIP), permitieron determinar cuáles son los índices de vegetación (IV) y longitudes de ondas más influyentes en la estimación del contenido de N foliar en cada una de las edades del cultivo estudiadas. En este sentido, se encontró que los índices más influyentes en la estimación del elemento en el periodo de estudio son: CVI, CCCI, ENDRE y Cirededge710.

En las metodologías PLS-R y PLS-FDR, se pudo observar que las regiones influyentes variaron acorde con el desarrollo fenológico del cultivo. Se corroboró lo encontrado por Murillo & Carbonell (2012), quienes reportaron que las bandas del verde (510 – 565 nm), el rojo (610 –

645 nm), el límite rojo (695 – 730 nm) y el NIR (765 – 829 nm) tienen alta influencia para estimar el contenido de N foliar. También se encontró que la región del azul entre 450 – 495 nm, reportó alta influencia en la estimación del N foliar en las 6 campañas de medición.

Los índices de vegetación y las longitudes de onda que mostraron alta influencia están estrechamente relacionados. Esto abre la posibilidad de crear IV que utilicen longitudes de onda sensibles a las variaciones del N foliar en las diferentes etapas de desarrollo vegetativo del cultivo de la caña de azúcar (CC-011940).

Se recomienda realizar estudios que involucran otros elementos importantes como el K, P, Mg y Ca, para determinar si existen correlaciones positivas entre la reflectancia espectral y el contenido foliar de estos elementos.

Las mediciones espectrales se deben realizar preferiblemente en días de alta radiación solar, entre las 11 am y 1 pm, tiempo en el cual el sol se encuentra cerca del Cenit, y el ángulo de incidencia de la radiación con la vegetación es cercano a 90°. Además, se debe referenciar constantemente la irradiancia solar sobre un panel de referencia, con el fin de evitar ruidos asociados a la presencia de nubosidad.

4. Impactos actual o potencial:

Impacto académico: Se desarrolló una plataforma aérea autónoma integrada con microsensores espectrales para el monitoreo de un cultivo, un sistema de gestión y planificación de vuelo del sistema autónomo para la captura georreferenciada de datos del cultivo. Tiene un potencial académico alto en cursos avanzados de pregrado y de posgrado, así como para proyectos de investigación y trabajos de grado.

Impacto de la investigación: Esta plataforma es idónea para hacer investigaciones relacionadas con el control de aeronaves, planificar vuelos de drones, evaluación de nuevos sensores y desarrollos relacionados con la espectroscopía. Se pueden hacer experimentos de diversa índole para analizar y evaluar el desempeño controladores con estrategias complejas,

así como el registro de datos a partir de nuevas tecnologías que pueden estar embarcadas en los drones.

Desarrollos futuros: La información espectral obtenida es útil y tiene un alto potencial para estimar el contenido de N foliar en tiempo real en el cultivo de caña de azúcar. Esta permite diagnosticar deficiencias y posibles excesos de N en el tejido foliar, y con ella es posible ajustar el manejo de la fertilización nitrogenada y tomar decisiones sobre la fuente, dosis y momento de aplicación. Además, permite incluir la variabilidad espacial del elemento en el cultivo.

Los resultados encontrados tanto en este estudio, como en otras investigaciones en diferentes cultivos agrícolas, abren la posibilidad de seguir estudiando el estado de salud de las plantaciones agrícolas mediante estas técnicas de espectroscopia. Sin embargo, a la hora de realizar dichas medidas, se debe de tener en cuenta que tanto las variaciones climáticas, como topográficas (tierras escarpadas) juegan un papel preponderante en la interacción de la radiación electromagnética con el tejido vegetal.

5. Productos:

Tabla No. 1. Cantidad y tipo de productos pactados en el *Acta de Trabajo y Compromiso* y productos finalmente presentados

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS				No. de PRODUCTOS PRESENTADOS			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Productos de nuevos conocimientos								
Artículo en revista ISI-SCOPUS:	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
		2						
Artículo completo publicado en revistas indexadas	A1	A2	B	C	A1	A2	B	C
Libros de autor que publiquen resultados de investigación								



Capítulos en libros que publican resultados de investigación				
Productos o procesos tecnológicos patentados o registrados				
· Prototipos y patentes				
· Software				
Productos o procesos tecnológicos usualmente no patentables o protegidos por secreto industrial				
Normas basadas en resultados de investigación				
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados	No. de tesis	No. De estudiantes Vinculados	No. De tesis
Estudiantes de pregrado			4	
Semillero de Investigación				
Estudiantes de maestría				
Estudiantes de doctorado	1		1	
Joven investigador				
Productos de divulgación				
Publicaciones en revistas no indexadas				
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales
		1		2
Propuesta de investigación				



Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación		
--	--	--

Tabla No. 2. Detalle de productos

Tipo de producto:	Artículo en preparación (70%)
Nombre General:	Hyperspectral sensing to estimate canopy nitrogen concentration in the stage of fast growth of sugar cane
Nombre Particular:	NA
Ciudad y fechas:	Cali
Participantes:	Aldemar Reyes, Martha Constanza Daza, Efraín Solarte, Esteban Rosero
Sitio de información:	NA
Formas organizativas:	REGAR

Tipo de producto:	Artículo en preparación (50%)
Nombre General:	Relación entre índices de vegetación, bandas espectrales y concentraciones de Nitrógeno foliar en caña de azúcar
Nombre Particular:	NA



Ciudad y fechas:	Cali
Participantes:	Aldemar Reyes, Martha Constanza Daza, Efraín Solarte, Esteban Rosero
Sitio de información:	NA
Formas organizativas:	REGAR

Tipo de producto:	Estudiante de doctorado vinculado (Doctorado en Ingeniería con énfasis)
Nombre General:	BIOINDICADORES ESPECTRALES PARA MONITOREO DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR EN CONDICIONES DE TENSIÓN AMBIENTAL POR DISPONIBILIDAD DE NITRÓGENO.
Nombre Particular:	NA
Ciudad y fechas:	Cali, Colombia, fecha de presentación pública de la propuesta: 18 de mayo de 2018.
Participantes:	Aldemar Reyes
Sitio de información:	Propuesta en ejecución
Formas organizativas:	Óptica cuántica, Grupo de Investigación Gestión Integral de Riego para el Desarrollo Agrícola y la Seguridad Alimentaria.

Tipo de producto:	Tesis de pregrado (Ingeniería agrícola)
-------------------	--



Nombre General:	Estimación del estrés hídrico en caña de azúcar usando técnicas de espectroscopía de reflectancia difusa
Nombre Particular:	NA
Ciudad y fechas:	Ciudad: Cali. Fecha de sustentación pública: 24 de mayo de 2019
Participantes:	Mayra Alejandra Mejía Martínez
Sitio de información:	Biblioteca Mario Carvajal, Universidad del Valle
Formas organizativas:	Gestión Integral de Riego para el Desarrollo Agrícola y la Seguridad Alimentaria.

Tipo de producto:	Tesis de pregrado (Ingeniería agrícola)
Nombre General:	Evaluación de la respuesta espectral en plantas de caña de azúcar bajo diferentes dosis de fertilizante nitrogenada
Nombre Particular:	NA
Ciudad y fechas:	Ciudad: Cali. Fecha de sustentación pública: 24 de mayo de 2019
Participantes:	Julian Andrés Aponzá Mancillas
Sitio de información:	Biblioteca Mario Carvajal, Universidad del Valle
Formas organizativas:	Gestión Integral de Riego para el Desarrollo Agrícola y la Seguridad Alimentaria.



Tipo de producto:	Tesis de pregrado (Ingeniería agrícola)
Nombre General:	Estimación del nitrógeno foliar en caña de azúcar mediante el uso de espectroscopía óptica
Nombre Particular:	NA
Ciudad y fechas:	Ciudad: Cali. Fecha de sustentación: 17 de octubre de 2019
Participantes:	Ana María Hurtado Villafane Ober Jeiber Perafán Trujillo
Sitio de información:	Programa de Ingeniería agrícola
Formas organizativas:	Óptica cuántica

Tipo de producto:	Tesis de pregrado (Ingeniería electrónica)
Nombre General:	Sistema de gestión de vuelo e información de un cuadricóptero para el mapeo de contenido de nitrógeno de un cultivo usando microsensores espectrales
Nombre Particular:	NA
Ciudad y fechas:	Ciudad: Cali. Fecha de evaluación del anteproyecto:
Participantes:	Juan Camilo Quintero
Sitio de información:	Programa de Ingeniería electrónica



Formas organizativas:	Grupo de investigación en percepción de sistemas inteligentes
-----------------------	---

Tipo de producto:	Ponencia internacional
Nombre General:	XII Reunión nacional de óptica
Nombre Particular:	Optical coefficients of monocotyledonous plant leaves via kubelka-munk modeling of diffuse reflectance measurements
Ciudad y fechas:	Castellón, España. Fecha de publicación: 3-6 de julio de 2018
Participantes:	Reyes Trujillo Aldemar, Rodriguez Martinez Jhon Freddy, Galindez Jamioy Carlos, Solarte Rodriguez Efrain
Sitio de información:	Archivos del Grupo de Investigación
Formas organizativas:	Optica Cuantica

Tipo de producto:	Ponencia internacional
Nombre General:	XV encuentro nacional de óptica y VI conferencia andina y del Caribe en óptica y sus aplicaciones
Nombre Particular:	Spectral characterization of water stress in a sugar cane crop located in a geographic valley of the Cauca river



Ciudad y fechas:	Ciudad: Bucaramanga, Colombia. Fecha de publicación: 20-26 de noviembre de 2017
Participantes:	Aldemar Reyes Trujillo y Efraín Solarte
Sitio de información:	Archivos del Grupo de Investigación
Formas organizativas:	Óptica cuántica

Bibliografía

AVELLANA, C.M. (2005). Análisis de la varianza con un factor Anova, Universidad de Barcelona. Recuperado: 22 de noviembre del 2017 de http://www.ub.edu/aplica_infor/spss/cap4-7.htm.

LI, L., LU, J., WANG, S., MA, Y., WEI, Q., LI, X., & CONG, R. (2016). Methods for estimating leaf nitrogen concentration of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) using in situ leaf spectroscopy, Universidad de Agricultura de Huazhong, China. 11.

MARABEL, M., & ALVAREZ, F. (2014). Estimación de biomasa en herbáceas a partir de datos hiperespectrales, regresión PLS y la transformación continuum removal, Universidad de León, España. 10.

MURILLO, P., & CARBONELL, J. (2012). Principios y aplicaciones de la percepción remota en el cultivo de la caña de azúcar en Colombia, Centro de investigación de la Caña de Azúcar de Cali, Colombia.

STEIDLE, A., VITOR, J., ZOLNIER, S., LOPES, D., PIRES, C., & F. DA SILVA, T. (2017). Prediction of mineral contents in sugarcane cultivated under saline conditions based on stalk scanning by Vis/NIR spectral reflectance, Universidad Federal de Sao Joao, Universidad Federal de Vicosa y Universidad Rural Federal de Pernambuco. Brazil. 10 p.



La presente versión del informe contiene las observaciones de los evaluadores:

Firma del investigador principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones

*Por favor presente su informe impreso y en formato digital en hoja tamaño carta, letra arial 11,
con espacios de 1 1/2*