

Wireless sensor network with cluster topology with sink node in unmanned aerial vehicle for data collection of edaphoclimatic variables of a banana plantation

Red inalámbrica de sensores con topología clúster con nodo sumidero en vehículo aéreo no tripulado para la recolección de datos de las variables edafoclimáticas de un cultivo de banano

*Luis Camargo¹, Maira Gasca², Luis Carrillo³

¹PhD. en Ciencias mención gerencia, lcamargo@unimagdalena.edu.co, ORCID: 0000-0002-7956-441X, Universidad del Magdalena, Colombia.

²PhD. en Ciencias mención gerencia, magasca@uan.edu.co, ORCID: 0000-0003-0801-1161, Universidad Antonio Nariño, Colombia.

³Ing. en Electrónica, luiscastrillojf@unimagdalena.edu.co, ORCID: 0000-0003-3312-351X, Universidad del Magdalena, Colombia.

How to cite: L. Camargo, M. Gasca and L. Castrillo, “Red inalámbrica con topología clúster con nodo sumidero en vehículo aéreo no tripulado para la recolección de datos de las variables edafoclimáticas de un cultivo de banano”, *Respuestas*, vol. 26 no. 1, January-April, 2021, pp.168-180

Received: June 26, 2020 ; Approved on October 20, 2020

Keywords:

WSN,
Radio frequency,
UAV,
Banana Variety Williams,
Cluster Head

ABSTRACT

In this work, the parameters for the connectivity of a wireless sensor network with cluster topology with a sink node in an unmanned aerial vehicle for the collection of data on the edaphoclimatic variables of a Williams variety banana crop are established. For this, the losses of the wireless channel in the plantation are modeled at a frequency of 900 MHz, with the purpose of estimating the distance between the nodes of the network. In addition, the overflight height and the approach distance of the drone to the cluster head node are estimated, using 2400 MHz transmitters and $\lambda/4$ line-of-sight antennas. A loss model is obtained with an average channel attenuation of 68.99 dB, a path loss exponent of 4.88 and a standard deviation of 4.2 dB. A distance between nodes of 71 meters is determined using a shadow of 4.3 dB for a probability of success of 85%. An overflight height of 40 meters is established with an approach distance to the cluster head node of 20 meters. It is concluded that it is possible to implement this type of network in this plantation using XBee technology for communication between the cluster nodes and WiFi to connect the sink node and the cluster head nodes..

*Corresponding author.

E-mail address: lcamargo@unimagdalena.edu.co (Luis Camargo)



Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santande
This is an article under the license CC BY 4.0

RESUMEN

Palabras Claves:

Redes de sensores inalámbricos,
Radio frecuencia,
VANT,
Banano variedad Williams
Líder del clúster

En este trabajo se establecen los parámetros para la conectividad de una red inalámbrica de sensores con topología clúster con nodo sumidero en vehículo aéreo no tripulado para la recolección de datos de las variables edafoclimáticas de un cultivo de banano variedad Williams. Para esto se modelan las pérdidas del canal inalámbrico en la plantación a una frecuencia de 900 MHz, con el propósito de estimar la distancia entre los nodos de la red. Además, se estima la altura de sobrevuelo y la distancia de acercamiento del dron al nodo cabeza de clúster, empleando transmisores a 2400 MHz y antenas $\lambda/4$ con línea de vista. Se obtiene un modelo de pérdidas con una atenuación promedio del canal de 68.99 dB, un exponente de pérdidas de camino de 4.88 y una desviación estándar de 4.2 dB. Se determina una distancia entre nodos de 71 metros usando una sombra de 4.3 dB para una probabilidad de éxito del 85%. Se establece una altura de sobrevuelo de 40 metros con distancia de acercamiento al nodo cabeza de clúster de 20 metros. Se concluye que es posible implementar este tipo de red en esta plantación usando tecnología XBee para la comunicación entre los nodos de clúster y WiFi para conectar el nodo sumidero y los nodos cabeza de clúster.

Introducción

El banano es el tercer producto del sector agrícola que más se exporta en Colombia. Este genera ingresos aproximados de 800 millones de dólares americanos por año. La región caribe en los departamentos de Magdalena, Cesar y La Guajira aportan aproximadamente un 35% de estas exportaciones, con la producción de la variedad Williams [1]. Asimismo, el banano es catalogado como uno de las frutas más importantes en la alimentación de las personas a nivel mundial [2].

El cambio climático, el crecimiento poblacional, la degradación ambiental, y la aparición y globalización de plagas dificultan la producción de alimentos [3]. Estos factores provocan la búsqueda e implementación de estrategias que ayuden a contrarrestar el impacto negativo de estos fenómenos en los cultivos agrícolas.

La agricultura inteligente surge como una estrategia que incorpora un conjunto de herramientas tecnológicas que permite mejorar el rendimiento de los cultivos. Esta ayuda a gestionar eficientemente el recurso hídrico y el consumo de insumos como herbicidas, pesticidas y fertilizantes [4]. La agricultura inteligente incluye tecnologías como el Internet de las Cosas (en Inglés Internet of Things, IoT), el Big Data, la Inteligencia Artificial, las Redes Inalámbricas de Sensores (en Inglés Wireless Sensor Network, WSN), entre otras [5]. Las WSN representan una solución tecnológica para la recolección de datos y el monitoreo de variables ambientales y del suelo en los cultivos agrícolas [6].

La medición de variables edafoclimáticas que comprende las características físicas, químicas y biológicas del suelo y las variables climáticas como la precipitación, radiación solar, temperatura, presión atmosférica entre otras; permiten priorizar, focalizar y determinar el grado de aptitud de un territorio para la producción agrícola [7]. Además, facilita la gestión de los recursos requeridos en la producción.

Las WSN se componen de nodos sensitivos y nodos sumideros o puerta. Los nodos sensitivos recolectan los datos del entorno y los transmiten hacia otro nodo. Los nodos sumideros se encargan de recopilar la información de los nodos sensores y luego enviarla hacia una estación base (Base Station, BS) o un centro de datos para su visualización y tratamiento [8]. Generalmente, las WSN se despliegan con base a una topología tipo malla, donde la información debe ser retransmitida por diferentes nodos antes de llegar al nodo sumidero [9]. Por lo tanto, se deben realizar estudios que permitan garantizar la conectividad entre los nodos sensores de la WSN para que la información logre llegar al nodo sumidero.

La topología de tipo malla presenta un problema denominado agujeros de energía. Los nodos sensores cercanos al nodo sumidero consumen su energía más rápido que los demás nodos de la red, debido a que realizan un mayor número de retransmisiones [10]. Esto ocasiona que estos nodos culminen su ciclo de vida antes, y provoquen que la información proveniente de los nodos más alejados tome otra ruta aumentando el retardo o simplemente que se pierda la conexión con el nodo sumidero; acortando el tiempo de vida y el rendimiento de la red [11]. Para solventar este problema se ha implementado la estrategia de darle movilidad al nodo sumidero [12], con el propósito de acerca el nodo sumidero a los diferentes nodos sensores y así cambiar la ruta de retransmisiones [13]. Esto logra equilibrar el consumo energético y los números de saltos en la red [14]

Los vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) representan una solución viable para la movilidad del nodo sumidero. Estos pueden sobrevolar el área donde la WSN se encuentre desplegada y desarrollar la recopilación de datos con mucha facilidad [15]. Sin embargo, pretender que el UAV sobrevuele por todos y cada uno de los nodos sensores para recolectar información, supone un gasto energético y de tiempo considerable de vuelo. Por consiguiente, se ha planteado una solución alternativa basada en la implementación de una red con Topología tipo Clúster. Esta corresponde a la creación de grupos de nodos sensores en los cuales se elige una Cabeza de Clúster (Cluster Head, CH) que recibe la información de los nodos de su grupo para posteriormente enviarla hacia el nodo sumidero [16]. El CH puede ser fijo o cambiar de acuerdo con características a la ruta del UAV, el nivel de energía restante, o la cantidad de nodos a los que brinde soporte [17].

Este trabajo plantea el análisis radioeléctrico de una WSN con topología tipo clúster y un UAV actuando como nodo móvil sumidero. La WSN recopilara los datos edafoclimáticos de un cultivo de banano de variedad Williams en la región caribe.

Materiales y Métodos

Esta es una investigación fundamental, explicativa y cuantitativa que tiene como objetivo establecer parámetros de diseño y condiciones radioeléctricas óptimas para la operación de una WSN en un cultivo de banano variedad Williams en la región caribe.

En primera instancia se caracteriza el canal inalámbrico en la plantación de banano, con el fin de determinar la distancia máxima de separación entre nodos sensores a la cual se garantiza la correcta transmisión de la información Ver figura 1.

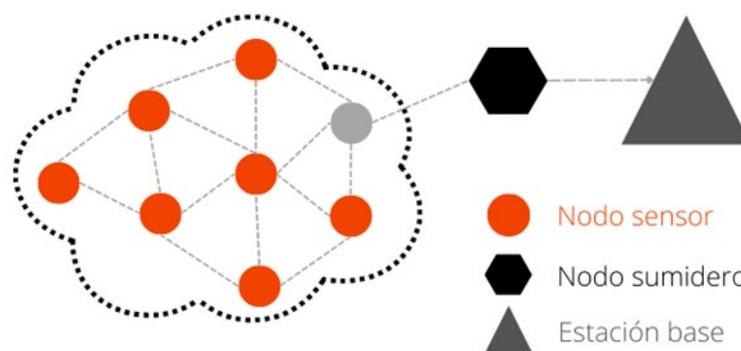


Figura 1. Topología de una red inalámbrica de sensores.

Por último, se estima la altura de sobrevuelo y la distancia mínima de acercamiento a la que debe transitar el nodo sumidero en el UAV para lograr la recolección de la información proveniente de los nodos cabeza de clúster. Ver figura 2.

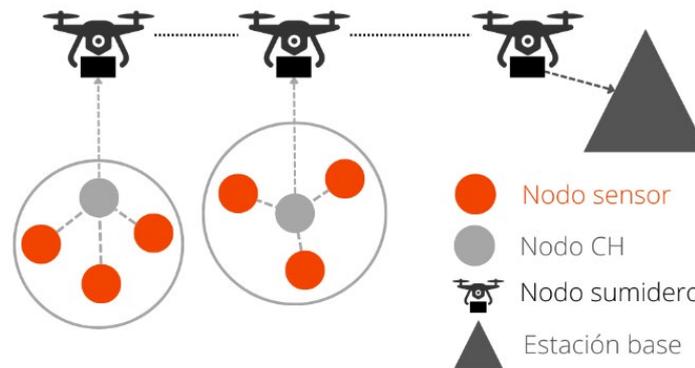


Figura 2. Red Inalámbrica de sensores en topología tipo Clúster y nodo sumidero en UAV

El diseño metodológico es el siguiente:

A. Modelado del canal inalámbrico en un cultivo de banano.

El modelo simplificado de pérdida de camino se utiliza para estimar la potencia recibida en el receptor en función de la distancia (ver ecuación 1).

$$P_R = P_T G K \left[\frac{d}{d_0} \right]^n \quad (1)$$

Dónde: P_R , es potencia recibida. P_T , es potencia transmitida. K , representa la atenuación promedio del canal. G , es el producto de las ganancias de las antenas transmisora y receptora en la dirección de línea de vista. n , es el exponente de pérdida de trayecto que depende de la frecuencia y del medio en el que se desarrolla la transmisión. d es la distancia de cobertura final. d_0 , es la distancia para el campo lejano de la antena y la referencia de distancia de muestreo inicial.

En dB es así, (ver ecuación 2).

$$P_R(\text{dBm}) = P_T(\text{dBm}) + G_T(\text{dBi}) + G_R(\text{dBi}) + K(\text{dB}) + 10n \text{Log}_{10} \left[\frac{d}{d_0} \right] (\text{dB}) \quad (2)$$

Los valores de K , d_0 y n se obtienen a partir de mediciones en la plantación de banano y de un análisis matemático y estadístico de los datos recolectados.

En la tabla 1 se detallan los parámetros de los radios utilizados para la comunicación entre los nodos de la red [18]. Estos módulos fueron configurados y utilizados en la jornada de mediciones.

Tabla I. Modulos Xbee Pro S3B.

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión	+ 24 dBm (250 mW)
Sensibilidad del receptor	-109 dBm (para 1% de paquetes perdidos)
Fuente de voltaje	2.4 a 3.6 VDC
Velocidad de los datos	RF 10Kbps o 20Kbps
Frecuencia de operación	ISM 900 MHz
Ganancia de la antena (externa)	2.1 dBi

El sitio elegido para realizar las mediciones es una pequeña finca ubicada en la parte rural del municipio Zona Bananera del departamento del Magdalena (Colombia). La altura del transmisor y el receptor es de 1.1 metros; esta altura es la altura media de una estación meteorológica para agricultura promedio. La herramienta Radio Range Test del software XCTU de DIGI es utilizada para medir la intensidad de la señal recibida, RSSI o PR. Las mediciones se realizan cada metro con varios muestreos por posición iniciando, de acuerdo a la recomendación dada por [19, 20]. Ver figura 3.

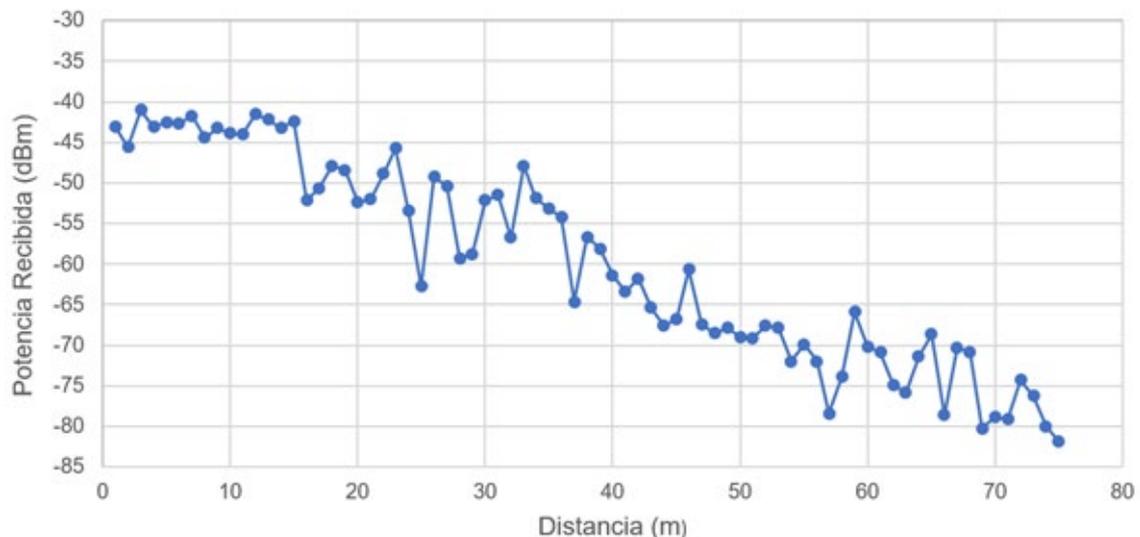


Figura 3. Potencia recibida medida

Se determinó un d_0 de 14 metros, ya que a menor distancia el PR no varía significativamente con las variaciones de las distancias, el resultado promedio a esta distancia es un RSSI de -43 dBm.

El valor medio del PR se utiliza para calcular las pérdidas en el canal en función de la distancia, Esto se realiza usando la ecuación 2 y los valores de la tabla 1. Ver ecuación 3 y 4.

$$P_R(dBm) - P_T(dBm) - G_T(dBi) - G_R(dBi) = K(dB) + 10n \text{Log}_{10} \left[\frac{d}{d_0} \right] (dB) \quad (3)$$

$$L = K(dB) + 10n \text{Log}_{10} \left[\frac{d}{d_0} \right] (dB) \quad (4)$$

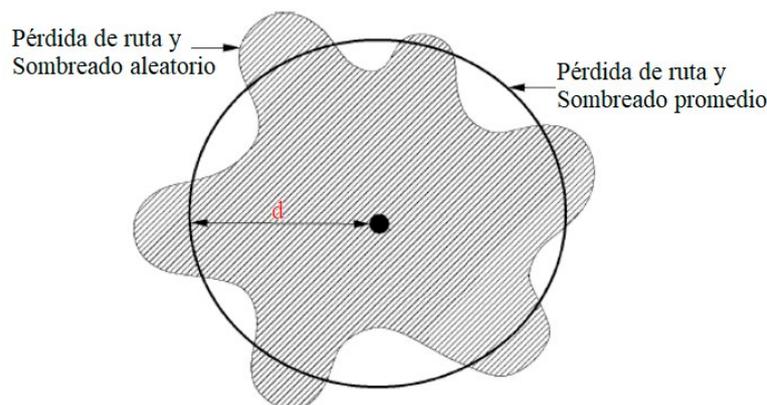
Para modelar las pérdidas y obtener el valor de las constantes k y n se transforma la variable independiente d a $x = (\log_{10}[d/14] = x)$, y se realiza una regresión lineal simple de los datos de L . Ver ecuación 5

$$L(dB) = K + 10n(x) \quad (5)$$

La diferencia entre lo medido y lo modelado determina la varianza (σ^2) y la desviación (σ), de acuerdo con la ecuación 6.

$$\sigma_{dB}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [L_{measured} - L_{model}]^2 \quad (6)$$

Se analizan los residuos evaluando que sigan una distribución normal con media cero, para lo cual se utilizando las pruebas de Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov. Esto tiene como propósito encontrar la sombra según la probabilidad y combinarla con las pérdidas de camino. Ver ecuación 7



$$L(dB) = K + 10(n) \text{Log}_{10} \left[\frac{d}{14} \right] + \psi_{dB} \quad (7)$$

Donde ψ_{dB} es la pérdida media relativa del camino en dB. Esta se obtiene usando La función de distribución de la distribución normal.

$$Prob(\varphi_{dB}) = \int \frac{1}{\sigma_{\varphi_{dB}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\varphi_{dB} - \mu_{\varphi_{dB}})^2}{2\sigma_{\varphi_{dB}}^2}} d\varphi_{dB} \quad (8)$$

A. Distancia entre nodos de la WSN

Para calcular la distancia entre nodo de la WSN a instalar dentro del cultivo de banano, se realiza un balance de potencia usando la ecuación 1, los valores de P_T , G_R y G_T suministrado por el fabricante (tabla 1) y la ecuación 7, con ψ_{dB} para una probabilidad de éxito del 85%.

P_R (real) es la potencia recibida por el dispositivo en la jornada de medida en la cual solo se pierde el 1% de los paquetes enviados en las pruebas. Ver ecuación 9 y figura 4.

$$P_{R_{real}} < (P_T + G_T + G_R - L) \quad (9)$$

Figura 4. Área de cobertura con y sin sombra

B. Modelado del canal inalámbrico entre el CH y el UAV

Para la comunicación entre el nodo cabeza de clúster CH y el nodo sumidero móvil en el UAV se utiliza la tecnología Wifi por tener una mayor velocidad de transmisión, comparada con los módulos Xbee usados para la comunicación entre nodos.

Se requiere una mayor velocidad debido a: que el nodo CH envía la información de todos los nodos de clúster y, que el nodo sumidero en el UAV está en movimiento y el tiempo de conexión entre CH y UAV es poco.

Las especificaciones del módulo usado se muestran en la tabla II [21].

Tabla II. Módulos ESP 32

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión	+ 18.5 dBm (70.8 mW)
Sensibilidad del receptor	-98 dBm
Fuente de voltaje	3 a 3.6 V _{DC}
Velocidad de los datos	1 Mbps - 54Mbps
Frecuencia de operación	ISM 2400 MHz
Ganancia de la antena (externa)	2.15 dBi

Para estimar las pérdidas de canal se usa el modelo de Friis como se muestra en la ecuación 10. Dónde: D, es la distancia entre UAV y el nodo cabeza de clúster.

$$P_R = \left[\frac{\lambda}{4\pi D} \right]^2 G_T G_R P_T \quad (10)$$

La ganancia de las antenas G_T y G_R depende del ángulo θ . Este ángulo se mide con respecto al eje vertical. θ , varía según la posición del UAV. Ver ecuación 11 y figura 5.

$$G_T = G_R = 1.64 \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{\sin(\theta)} \right]^2 \quad (11)$$

Para una correcta comunicación se busca que exista línea de vista entre el CH y el UAV. que Los efectos de los obstáculos cercanos a la línea de vista (Zonas de Fresnel) se desprecian. El ángulo θ para lograr la línea de vista no debe superar los 30,8 grados. Esto se calcula a partir de la altura del CH, la altura promedio de la

planta (3 m) y la separación entre las plantas (2 m). Ver figura 5.

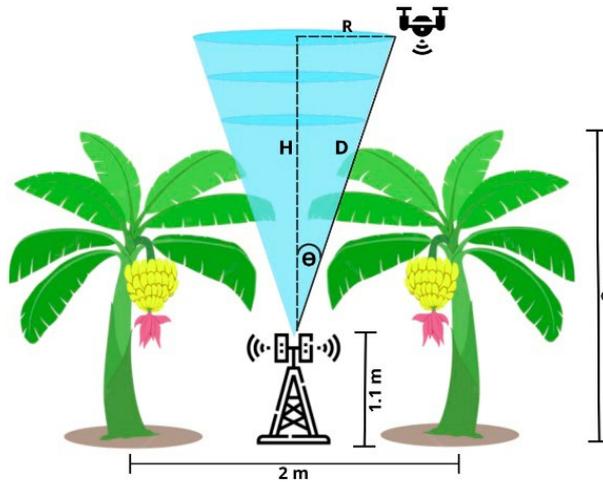


Figura 5. Escenario para la comunicación del nodo CH y el UAV

C. Altura de vuelo y distancia de proximidad al nodo CH.

La altura de vuelo y distancia de acercamiento al nodo se estima a partir del cálculo de la P_R . Ver figura 6.

Para determinar estas medidas se tiene en cuenta que θ no supere los 30.8 grados. Además, se usa la potencia del transmisor especificada por el fabricante ($P_T = 18.5$ dBm) y como P_R se utiliza un 10% menos de la sensibilidad especificada (-88.2 dBm). Ver ecuación 12

$$P_R(\text{dBm}) > P_T(\text{dBm}) + \frac{P_R}{P_T}(\text{dB}) \tag{12}$$

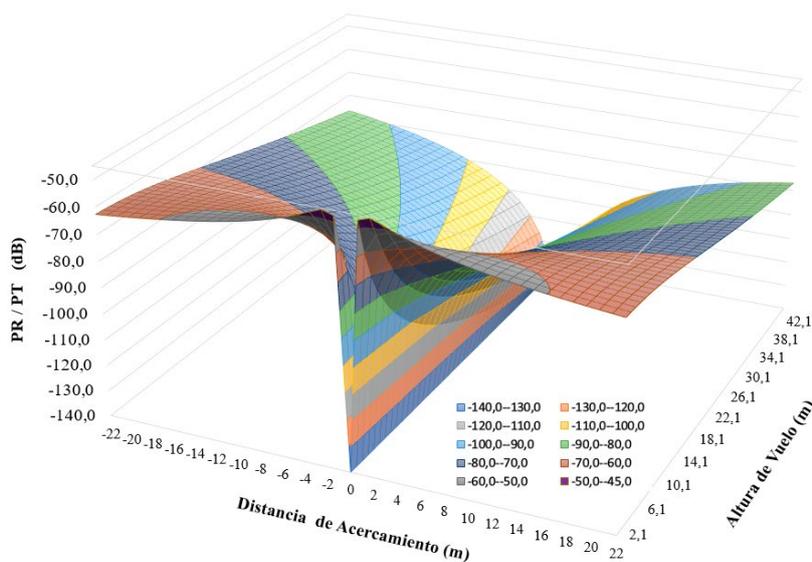


Figura 6. Pr/PT en el escenario para la comunicación del nodo CH y el UAV

Resultados y Discusión

Los principales resultados de la investigación se enuncian a continuación:

A. Modelo simplificado de pérdidas para una plantación de banano variedad Williams.

En la figura 7 se muestra el comportamiento de las pérdidas de camino en una plantación.

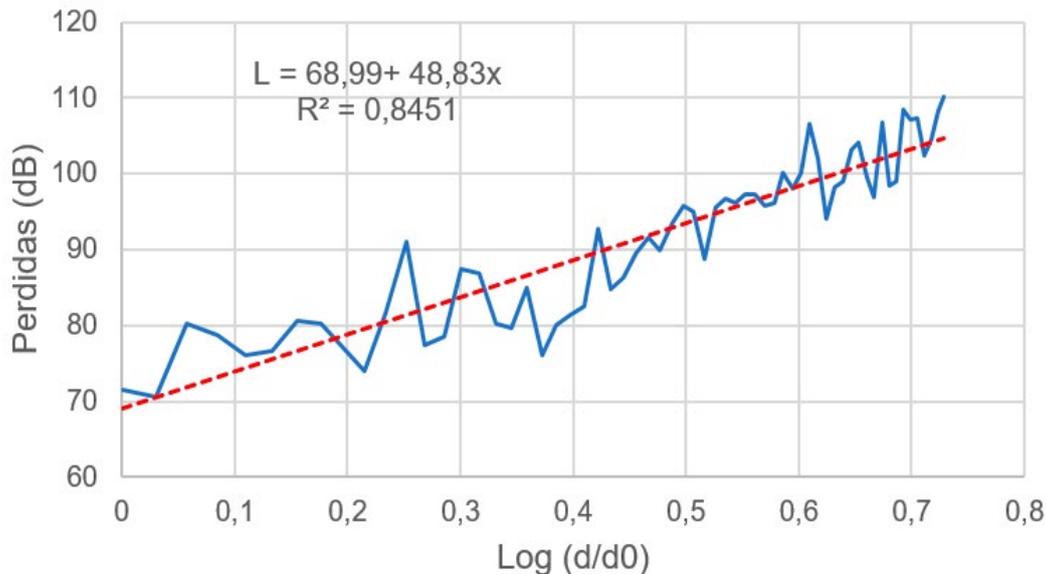


Figura 7. Pérdidas de camino en un cultivo de banano

El modelo tiene un coeficiente de correlación $R^2=0.8451$. La desviación es de $\sigma = 14.64$ y la varianza de $\sigma^2 = 4.2$ en dB.

Los residuos obtenidos del modelo son población normalmente distribuida según las pruebas de normalidad según las pruebas de Shapiro-Wilks (P-Valor = 0.752, W = 0.9771) y la prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov (P-Valor = 0.8882, D = 0.0738).

Para una probabilidad de éxito del 85% usando la distribución normal se estima una sombra de 4.3 dB. En la tabla III se explica cada parámetro del modelo propuesto.

Tabla III. Modelo de canal inalámbrico para un cultivo de banano

PARAMETER		VALUE
The average channel attenuation	K	-68.99 dBm
The path-loss exponent	n	4.883
The initial sample distance reference	d0	14 meter
Standard deviation	σ	4.2 dB
Shadowing	ψ	4.3 dB

B. Comparación de las pérdidas obtenidas con modelos IEEE para la tecnología 802.15.4

Los datos obtenidos en la medición se comparan con algunos modelos de pérdidas reconocidos para esta

tecnología. Para esto se estudia su desviación. Ver tabla IV [22].

Tabla IV. Comparación de las medidas obtenidas en el cultivo de banano con modelo de otros autores.

Entorno	K	n	σ
Residential LOS	-43.9 dB	1.79	40.03 dB
Residential NLOS	-48.7 dB	4.58	22.09 dB
Indoor office LOS	-35.4 dB	1.63	49.18 dB
Indoor office NLOS	-57.9 dB	3.07	20.21 dB
Outdoor LOS	-45.6 dB	1.76	38.51 dB
Outdoor NLOS	-73 dB	2.5	9.43 dB
Snow-covered open área	-48.96 dB	1.58	36.1 dB
Industrial LOS	-56.7 dB	1.2	30.45 dB
Industrial NLOS	-56.7 dB	2.15	25.81 dB

Se puede observar que el modelo con mejor rendimiento es el Outdoor NLOS. Este tiene una desviación de 9.43 dB con respecto a las medidas. Esta es superior a la desviación obtenida con el modelo propuesto

C. Topología de la red de sensores en tierra con sus respectivas distancias entre nodos

La distancia entre nodos de WSN dentro del cultivo se calcula usando el modelo propuesto más una sombra de 4.3 dB. El nivel de sensibilidad del receptor (P_R) usado como referencia es de -80 dBm. A esta potencia se obtiene unas pérdidas de paquetes menor al 1% según la jornada de medición en el cultivo de banano. El valor de la sensibilidad del módulo de RF informado por el fabricante (-109 dBm) es despreciado debido que a ese nivel de potencia los paquetes perdidos superan el 10% según la jornada de medición.

$$-80 \text{ (dBm)} < \left(24 + 2.1 + 2.1 - 68.99 - 10(4.88) \text{Log}_{10} \left[\frac{d}{14} \right] - 4.3 \right) \quad (13)$$

De la ecuación anterior se obtiene una distancia máxima entre nodos de 72 metros.

Para una cobertura de una finca bananera con 9 hectáreas (300m x 300m), se obtuvo una red tipo malla con distancia entre nodos de 71 metros ($d=71$).

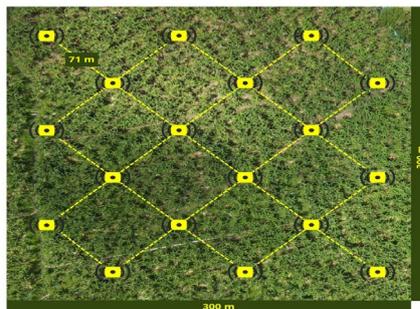


Figura 8. WSN en el cultivo de banano

D. Altura de sobre vuelo del UAV y distancia de cercanía al nodo sensor CH para línea vista.

Existen diferentes alternativas de altura de vuelo y distancias de acercamiento posibles para obtener una comunicación óptima entre el nodo CH y el UAV.

En las figuras siguientes se describen estas posibilidades en color verdes. Esto representa una P_R superior a la requerida ($P_R > -82.2$ dBm) y una línea de vista ($\theta < 30.8$). Ver figura 9 y 10

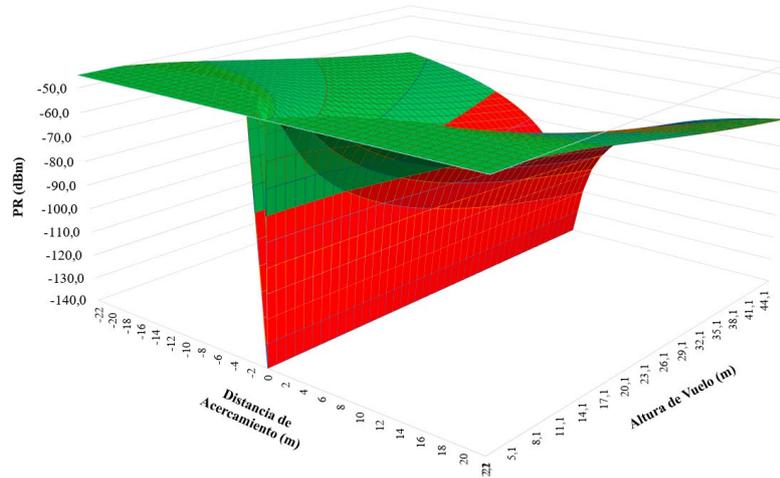


Figura 9. Potencia recibida optima

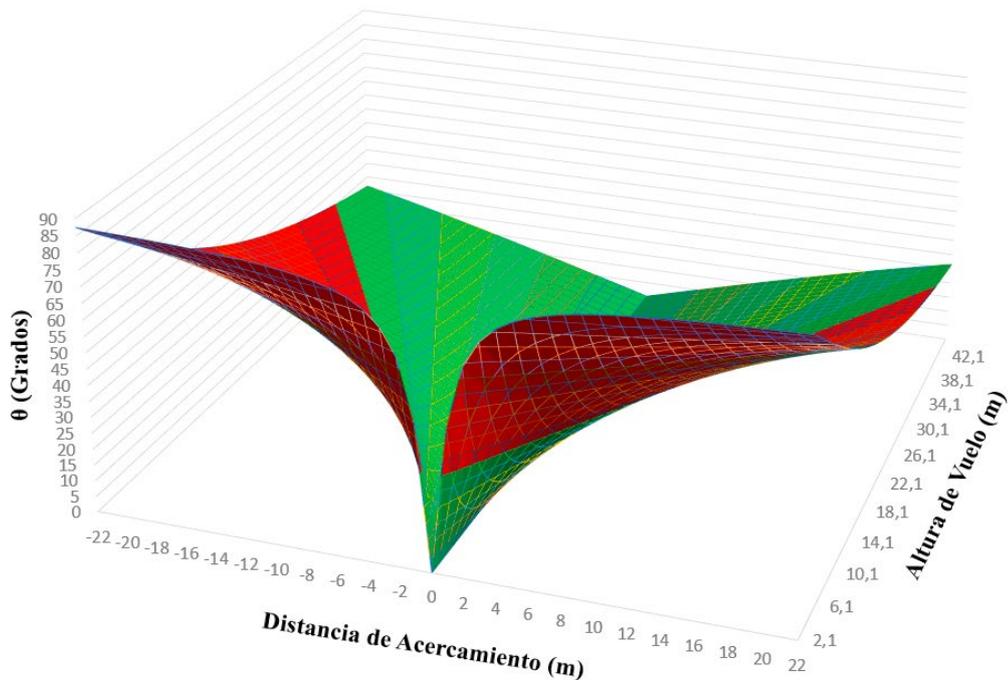


Figura 10. Angulo de línea de vista

E. *Topología de Clúster para la red de sensores soportado con el UAV.*

Se establecen 3 clúster con 6 nodos cada uno y se elige un nodo cabeza por clúster CH al centro de la plantación. Se escogió una altura de sobrevuelo de 40 metros lo que representa una distancia de acercamiento al nodo CH aproximada de 20 metros.

Teniendo en cuenta lo anterior el UAV solo debe atravesar la plantación por la mitad para recoger la información de todos los nodos de la red.

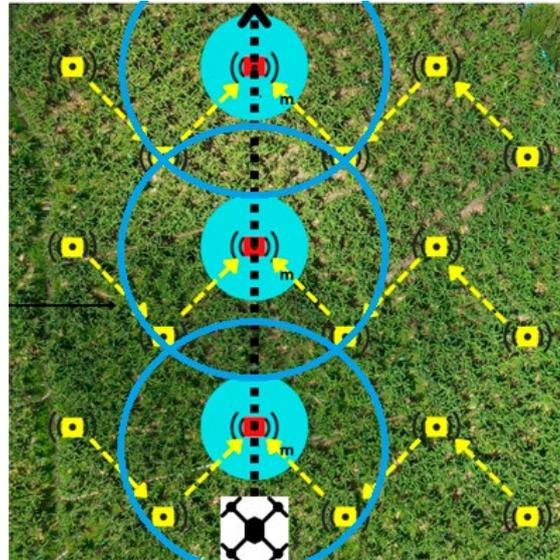


Figura 11. Topología de la red propuesta.

Se puede implementar el nodo sumidero móvil en el UVA usado en la fumigación del cultivo, para evitar costo asociados a la recolección de los datos; o se puede utilizar un UVA de tamaño pequeño que no consuma mucha potencia que pueda realizar el recorrido a la plantación con una carga de su batería.

Conclusiones

Es posible implementar una WSN en topología de clúster con nodo sumidero móvil ubicado en un vehículo aéreo no tripulado para la recolección de datos de las variables edafoclimáticas de un cultivo de banano variedad Williams. Esto utilizando en la plantación nodos sensores conectados con tecnología Xbee a la frecuencia de 900 MHz, y en aire un UAV en movimiento con conexión Wifi con los nodos cabeza de clúster a la frecuencia de 2400 MHz.

El modelado del canal inalámbrico del cultivo de banano obtenido tiene un exponente de pérdidas más alto que el propuesto en el modelo Outdoor NLOS de la IEEE. Por esto, la importancia de realizar primero el modelado del canal para determinar la separación máxima de los nodos y garantizar la correcta operación de la WSN

La altura a la que vuela UAV es determinante para establecer el radio de cobertura del nodo cabeza de clúster. Esto debido primordialmente al patrón de radiación de la antena utilizada y a la ubicación del nodo dentro de las plantas de banano. La obstrucción de la línea de vista entre UAV y el nodo por causa de la altura de las plantas adultas es la principal consideración.

Referencias

- [1] Asociación de Bananeros del Magdalena y La Guajira (ASBAMA). “Informe de gestión 2019”, [En línea]. Disponible en <https://www.asbama.com/administrador/img/informes/informes/76.pdf>.
- [2] B. Peris S. Forero, N. Piraneque, and S. Ramírez, “Parámetros edáficos asociados al daño por *Micospaerella fijiensis* Morelet en la Zona Bananera del Magdalena (Colombia)”, *Espacios*. vol. 39, no. 26, 2018.
- [3] M. Elferink and F. Schierhorn, “Global Demand for Food Is Rising. Can We Meet It?”, *Harvard Business Review*, vol. 7, no. 4, pp 1-4, 2016.
- [4] S. Hemming, F. de Zwart, A. Elings, A. Petropoulou, and I. Righini, “Cherry Tomato Production in Intelligent Greenhouses—Sensors and AI for Control of Climate, Irrigation, Crop Yield, and Quality,” *Sensors*, vol. 20, no. 22, pp. 6430, 2020. doi: 10.3390/s20226430.
- [5] M. Manideep, R. Thukaram, and M. Supriya, “Smart Agriculture Farming with Image Capturing Module”, in *2019 Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*, pp. 1-5, 2019
- [6] B. Saleh, A. Abouel-Kassem, A. Ezz El-Deen, et al., “ Gathering Big Data in Wireless Sensor Networks by Drone “, *Sensors*, vol. 20, no. 23, pp. 6954., 2019. doi:10.3390/s20236954
- [7] F. López-Morales, et al, “ Interacción genotipo-ambiente, estabilidad del rendimiento y calidad de grano en maíz Tuxpeño,” *Revista mexicana de ciencias agrícola* vol. 8, no. 5, pp. 1035-1050, 2017.
- [8] D. Kandris, C. Nakas, D. Vomvas, and G. Koulouras, “Applications of Wireless Sensor Networks: An Up-to-Date Survey,” *Applied System Innovation*, vol. 3, no. 1, p. 14, 2020. doi: 10.3390/asi3010014
- [9] J. Antunes, L. Brisolara, and P. Ferreira, “UAVs as Data Collectors in the WSNs: Investigating the Effects of Back-and-Forth and Spiral Coverage Paths in the Network Lifetime,” in *2020 X Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*, pp. 1–8, 2020. doi: 10.1109/SBESC51047.2020.9277860.
- [10] M. Krishnan, S. Yun, and Y. Jung, “Dynamic clustering approach with ACO-based mobile sink for data collection in WSNs,” *Wireless Networks*, vol. 25, no. 8, pp. 4859–4871, 2019, doi: 10.1007/s11276-018-1762-8
- [11] S. Smruthi, R. Krishna, and M. Panda, “Low Energy Sensor Data Collection using Unmanned Aerial Vehicles,” in *2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, pp. 740–745, 2019. doi: 10.1109/ICOEI.2019.8862558.
- [12] J. Wang, Y. Gao, C. Zhou, R. Simon Sherratt, and L. Wang, “Optimal Coverage Multi-Path Scheduling Scheme with Multiple Mobile Sinks for WSNs,” *Computers, Materials & Continua*, vol. 62, no. 2, pp. 695–711, 2020, doi: 10.32604/cmc.2020.08674.
- [13] J. Gomez-Rojas, L. Camargo, and R. Montero, “Mobile wireless sensor networks in a smart city”. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, vol. 11, no 1, pp. 1-8. doi:10.21307/ijssis-2018-009
- [14] X. Fu y X. He, “Energy-balanced data collection with path-constrained mobile sink in wireless sensor networks”, *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 127, pp. 153504, 2020, doi: 10.1016/j.aeue.2020.153504
- [15] C. Lima, E. da Silva, and P. Velloso, “Performance Evaluation of 802.11 IoT Devices for Data Collection in the Forest with Drones,” in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–7, 2018. doi: 10.1109/GLOCOM.2018.8647220.

- [16] O. Gul and A. Erkmén, “Energy-Efficient Cluster-Based Data Collection by a UAV with a Limited-Capacity Battery in Robotic Wireless Sensor Networks,” *Sensors*, vol. 20, no. 20, p. 5865, 2020, doi: 10.3390/s20205865.
- [17] B. Khan, R. Bilal, and R. Young, “Fuzzy-TOPSIS based Cluster Head selection in mobile wireless sensor networks,” *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 928–943, 2018, doi: 10.1016/j.jesit.2016.12.004
- [18] Digi International Inc, “Digi XBee®-PRO 900HP/XSC RF Modules data sheet,” 2020. <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90002173.pdf>
- [19] W. Lee, “Estimate of local average power of a mobile radio signal,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 34, no. 1, pp. 22–27. 1985. <https://doi.org/10.1109/T-VT.1985.24030>
- [20] ITU, “Manual: Comprobación técnica del espectro,” Oficina de Radiocomunicaciones, 2011. <http://handle.itu.int/11.1002/pub/80399e8b-en>
- [21] Espressif Systems, “Espressif Systems ESP32 Series data sheet,” 2020. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [22] A. F. Molisch, K. Balakrishnan, C. Chong et al, “IEEE 802.15.4a channel model-final report,” *IEEE P802*, vol. 15, no. 4, pp. 0662, 2004. doi:10.1.1.119.2038&rep=rep1&type=pdf