

Diseño de sensores para la adquisición y análisis de datos multimediales en Agricultura de Precisión*

Angie García-Castro, Laura Mancipe⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰³⁻³⁷⁶³⁻⁶¹⁵², Germán Andrés Garnica, and R.E. Gutiérrez-Carvajal⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰²⁻⁶⁰¹³⁻⁵⁴⁶

ACCEDER Research Group–Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia
ricardo.gutierrez@unimilitar.edu.co
<http://www.umng.edu.co/acceder>

Resumen La crisis alimentaria debida al crecimiento de la población, requiere del desarrollo de tecnologías que optimicen la producción y favorezca la toma de decisiones con el mínimo de incertidumbre en agricultura. Este trabajo propone el diseño de un conjunto de dispositivos de medición de múltiples variables ambientales, con el fin de establecer el estado de una plantación de café en tiempo real. Para su desarrollo se siguieron tres (3) etapas: 1. identificación de variables ambientales, 2. levantamiento de requisitos (agronómicos, electrónicos, ergonómicos y lógicos), finalmente 3. diseño de los dispositivos. Como resultado, se obtuvieron los parámetros y lineamientos de diseño para tres dispositivos de medición de múltiples variables, así como una primera disposición funcional de estos. El diseño de los dispositivos de medición alcanzados, permite el desarrollo de tecnología para el avance práctico y preciso, tanto agronómica como ergonómicamente adecuado, para su aplicación en la agricultura de precisión.

Keywords: Agricultura de precisión, Datos multimediales, Desarrollo de sensores.

1. Introducción

La crisis alimentaria en consecuencia del acelerado crecimiento de la población, hace necesaria la aplicación de técnicas que optimicen la producción y faciliten tomar decisiones frente a los cambios climáticos y otros factores que alteran el estado de los cultivos. Para Colombia la actividad agrícola es una de las principales fuentes económicas y se ve afectada igualmente por los factores previamente mencionados, entre las principales actividades agrícolas se encuentra la producción de café que aporta aproximadamente el 43 % del Producto interno bruto agropecuario del país [9].

Debido al incremento de tecnología en los últimos años, el sector de las TIC (Tecnologías de la Información y las Comunicaciones) en Colombia se regularizó

* Este proyecto es financiado por la Vicerrectoría de Investigación de Universidad Militar Nueva Granada en el marco del proyecto INV-ING-2640.

con el sector agropecuario, incentivando particularmente el desarrollo e implementación de estas como soporte para los procesos de planificación rural agropecuaria, con la agricultura de precisión [7]. De esta forma se ven solucionados diferentes aspectos que limitaban la producción optimizando y agilizando la misma.

Una de las tecnologías mas ampliamente utilizadas en agricultura de precisión es el uso de sensores remotos, estos son implementados por medio de imágenes satelitales o drones [13]. Sin embargo, estas tienen un costo elevado, por lo que no son usados por la mayoría de agricultores, además, para su uso comercial se requiere el cumplimiento del reglamento de la aeronáutica civil, i.e., tener licencia de piloto privado con curso en tierra, 40 Horas de vuelo y 200 despegues, aterrizajes certificados por la escuela de aviación, identificación y matrícula del dron, póliza de seguro para daños a terceros y solicitud con plan de vuelo ante la Aeronáutica Civil con 15 días hábiles de anticipación [4]. Por otro lado, los drones, son sensibles a imprecisiones en la recolección de datos debido a condiciones meteorológicas tales como lluvias y vientos [8, 10].

Por otra parte, en la literatura se propone el monitoreo de cultivos, esto mediante el uso de robots que se movilizan por la plantación e identifica la maleza, detecta el estado de riego de la planta y pulveriza selectivamente la cantidad correcta de herbicida [3]. Sin embargo, estos dispositivos necesitan el desplazamiento sobre todo el terreno donde puede llegar a ser poco factible, debido a que la toma de datos paralelos a lo largo de este se ve limitada o la necesidad de más de un robot, aumentando el tiempo en el que se podrían ejecutar las diferentes decisiones para el cultivo completo.

Otra alternativa es utilizar las redes de sensores inalámbricos (WSN) ya que permiten el desarrollo de sensores de bajo costo, tamaño reducido y alta precisión que se comunican a cortas distancias. Esto genera la posibilidad de monitorear múltiples variables a lo largo de todo el cultivo, midiendo las variables in-situ de cada sensor [15]. A pesar de la variedad de sensores disponibles para el monitoreo de diferentes variables, por lo general los dispositivos del mercado se limitan a estudiar aspectos específicos, tales como la temperatura o la humedad del suelo, ofreciendo un panorama limitado del estado del cultivo. Sin embargo, para llevar a cabo un estudio integral, es necesario tener en cuenta diferentes variables que al ser analizadas en conjunto, puedan ofrecer al agricultor información completa para tomar decisiones sobre el cultivo. Por lo tanto, si el dispositivo esta orientado al usuario, es necesario que los datos obtenidos sean presentados de una forma clara que muestre el estado actual y la evolución del cultivo [2, 11].

De acuerdo con lo anterior en este trabajo se propone el diseño de un conjunto de dispositivos de medición de múltiples variables ambientales simultáneamente, tomadas en el mismo punto geográfico, con el fin de establecer el estado de una planta específica en tiempo real. El análisis del conjunto de datos proporcionados por estos dispositivos, permitirá obtener un panorama global y así extraer información consistente, precisa y útil para apoyar la toma de decisiones sobre el cultivo en general y de cada planta en particular.

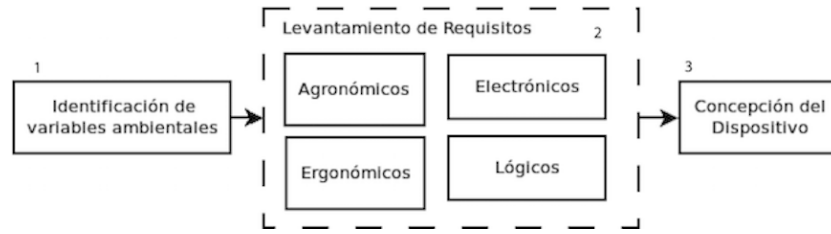


Figura 1. Esquema de metodología. Etapas de desarrollo.

Teniendo en cuenta estos conceptos, el resto de este documento se organiza así: En la sección 2 se presenta la metodología, donde se especifica el trabajo realizado para llegar al diseño del dispositivo de medición. La sección 3 presenta los resultados obtenidos, y finalmente en la sección 4 las principales conclusiones del trabajo realizado.

2. Metodología

La metodología propuesta sigue tres (3) etapas: (1) Identificación de variables ambientales, (2) Levantamiento de requisitos (agronómicos, electrónicos, ergonómicos y lógicos), (3) Diseño del dispositivo. Esta metodología se presenta en la Fig 1.

2.1. Identificación de variables ambientales

Se hizo un reconocimiento de aquellos factores ambientales que influyen en la producción, variables tenidas en cuenta por los agricultores para tomar decisiones frente a la forma en que cultivan. Estos factores están consignados en el Cuadro 1.

2.2. Levantamiento de requisitos

Una vez identificadas las variables a tener en cuenta en el estudio, se establecieron las necesidades para el diseño de los dispositivos. Para esto se tuvieron en cuenta 4 tipos de requisitos:

Agronómicos: El cultivo establece parámetros que indican los primeros requisitos para iniciar el diseño:

1. Densidad de siembra según variedad: En el país, se manejan diferentes variedades de café, que requieren de disposiciones de siembra especiales para lograr una máxima productividad [12]. Con el fin de desarrollar un dispositivo genérico, seleccionamos una densidad promedio entre las diferentes variedades, esto es aproximadamente 4.000 plantas/hectárea.
2. Distancia entre plantas: A partir de la selección de 4.000 plantas por hectárea como densidad apropiada, identificamos la distancia entre plantas y los surcos necesarios para lograr esta configuración. Esto es, distancia entre plantas de 1,25 m y surcos de 2 m [12], como se muestra en la Fig 2(a).

Cuadro 1. Variables ambientales relevantes para la producción.

Variable	Descripción	Rango de normalidad
Temperatura	Cuando la temperatura sobrepasa los límites establecidos, generan la deshidratación de la planta dificultando el proceso de fotosíntesis, si por otro lado son inferiores, pueden quemar los brotes disminuyendo la producción [6].	Entre los 17 y 23°C.
Humedad del aire	La presencia o proliferación de hongos en las plantas de café está relacionado con la humedad del aire y el suelo. Humedades superiores al 90 % favorecen la proliferación de hongos [5].	Humedad promedio de 70 % y 85 %. Variando desde el 35 % en horas del día y llegando al 100 % en la noche.
Humedad del suelo	La humedad del suelo tiene un impacto sensible sobre la producción y debe ser menor a 5 %. De lo contrario, las plantas tienen un proceso de descomposición [14].	Humedad del suelo promedio entre 3 % y 5 % aproximadamente.
Iluminación	El exceso de radiación solar en etapas tempranas genera la aparición de manchas en las hojas y finalmente lleva a que la planta se marchite. Por otro lado, la poca radiación, reduce los procesos de fotosíntesis disminuyendo el crecimiento y la producción de la planta	La radiación solar media varía entre 35.7 y 36.1 MJm ⁻² .día ⁻¹ .
Precipitaciones	Las precipitaciones de la zona de cultivo, cambian la humedad del suelo y el aire. Se considera como zona óptima para cultivo de café aquella que presente de 1.800 a 2.800 mm anuales [5].	1.800 a 2.800 mm anuales de lluvias y que ningún mes del año tenga menos de 100 mm. La zona debe de presentar entre 160 y 200 días lluviosos al año.
Presión atmosférica	Los cultivos de café en Colombia se encuentran entre los 1200 y 1800 metros sobre el nivel del mar [6].	615.05-660.054 mmHg.
Color de las hojas	El color de las hojas de la planta es un indicativo de la posible existencia de plagas, exceso de humedad o iluminación. El color normal, es verde oscuro brillante. Cuando las hojas son opacas o se tornan de colores amarillos, se entiende que están viejas, al igual que con coloraciones cafés. Por otro lado, la presencia de puntos blancos o negros son signos comunes de plagas y las manchas rojizas indican exceso de iluminación.	Subjetivo

3. Altura de la primera ramificación: La altura de las primeras hojas de las plantas de café dependen de la variedad, sin embargo, la Federación Nacional de Cafeteros (FNC) recomienda la poda baja o receta a una altura de 0,25 m -0,35 m del nivel del suelo, como se muestra en la Fig 2(b). para provocar la salida de nuevos brotes [1].
4. Diámetro de la planta: Considerando la distancia a utilizar entre plantas y la longitud del surco, la FNC proporciona información del área promedio que ocupan las plantas de café que crecen en estas condiciones. Esto es aproximadamente 2,5 m² dado un diámetro de 1,58 m y radio de 0,79 m [12]. Considerando la distancia entre plantas, las ramas de la plantas, cuando estas alcanzan su mayor tamaño, se cruzan unas con otras y en el surco quedan separadas por 0.4 m aproximadamente como se muestra en la Figura 2(c).

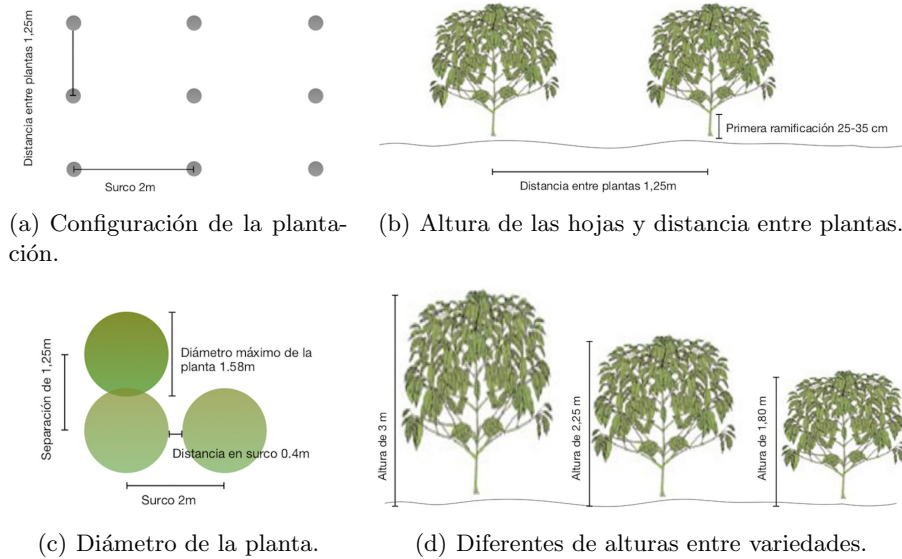


Figura 2. Requerimientos agronómicos.

5. Altura de la planta: la altura de las plantas fluctúan entre 1,8 m y 3 m aproximadamente para las variedades más cultivadas en Colombia, (Fig 2(d)). Sin embargo, el descope se recomienda una altura de 1 m para variedades de porte bajo y a 1,20 m para variedades de porte alto [1].

Electrónicos: Se establecieron los sensores y componentes electrónicos que permitieran obtener la información requerida, para realizar una buena fusión y análisis. Para esto, se identificó la capacidad de los posibles sensores en cuanto a muestreo y procesamiento. Teniendo en cuenta la cantidad de variables de estudio y las limitaciones a nivel de conexiones, se establecieron combinaciones de sensores, buscando que cada dispositivo arrojara información significativa, con esto estudiar la totalidad de variables sin perder la simultaneidad y la posibilidad de correlacionarlas entre si.

Ergonómicos: A partir de los requerimientos identificados en la plantación y conociendo los requerimientos electrónicos que conformarán cada dispositivo, se establecieron las características físicas del dispositivo. De esta forma, las dimensiones de los componentes internos y las condicionantes para obtener mediciones precisas en las plantas permitieron equilibrar los delimitantes del diseño en procura de la funcionalidad y la utilización del dispositivo en el área de medición.

Lógicos: Para garantizar el funcionamiento del dispositivo de tal forma que permita la recolección de datos, almacenamiento de dichos datos y análisis, se establecieron los requerimientos lógicos del dispositivo. De acuerdo con las WSN se necesita obtener y transmitir la información de manera inalámbrica, para

Cuadro 2. Variables ambientales estudiadas según dispositivo.

Dispositivo	Variables
Dispositivo 1	Humedad en tierra, Temperatura, Humedad en ambiente, Precipitaciones y Color de las hojas.
Dispositivo 2	Humedad en tierra, Iluminación, Radiación ultravioleta y Color de las hojas.
Dispositivo 3	Humedad en tierra, Presión, Estado de las hojas.

esto se implementó el uso de tres unidades las cuales realizan sus funciones independientemente.

1. Unidad de comunicación: transmite la información entre dispositivos y a un servidor central.
2. Unidad de procesamiento: analiza y procesa la información.
3. Unidad de sensores: recolectan la información.

2.3. Diseño del dispositivo

Una vez determinados los requerimientos de los componentes, sus relaciones y por ende, los delimitantes del dispositivo de medición, se procedió a diseñar la organización estructural y relacional del dispositivo de forma tal que cumplieran la totalidad de requerimientos identificados para solucionar su funcionamiento, así como en su portabilidad, ajuste en terreno y seguridad en su uso para alcanzar el mayor desempeño del conjunto.

3. Resultados

Teniendo en cuenta la cantidad de variables consideradas en este caso, se realiza el diseño un conjunto de tres dispositivos de medición para múltiples variables ambientales en modo simultáneo.

3.1. Variables ambientales

En el Cuadro 2, se relacionan las variables ambientales estudiadas por cada dispositivo de medición, estas permiten correlacionar los datos y obtener nueva información de cada dispositivo.

3.2. Levantamiento de requisitos

1. Agronómicos: Los requerimientos agronómicos de la plantación de café descritos en la metodología, permiten establecer los parámetros de diseño que se relacionan en el Cuadro 3.
2. Electrónicos: Los requerimientos electrónicos de los dispositivos de medición, incluyen sensores, y unidades de comunicación, almacenamiento y energía, todos los elementos de cada dispositivo serán conectados por cableado, estos se relacionan en el cuadro 4.

Cuadro 3. Características del dispositivo según requerimientos agronómicos.

Característica	Descripción	Valor
Altura máxima del cuerpo del dispositivo	El cuerpo del dispositivo debe ubicarse bajo la planta junto al tallo, así su altura máxima esta dada por la altura de la primera ramificación.	0,25 mts.
Ancho máximo del dispositivo	El ideal es el diseño de un dispositivo pequeño, sin embargo para ubicarlo bajo la planta, el limite de espacio corresponde al radio de esta.	0,79 mts.
Altura máxima de los sensores expuestos al agua y la luz	Para obtener datos reales de precipitaciones e iluminación se requiere que los sensores puedan ubicarse en la copa de los arboles.	3 mts.

Cuadro 4. Requerimientos electrónicos según dispositivo.

Requerimiento	Dispositivo 1	Dispositivo 2	Dispositivo 3
Sensores	Humedad en tierra, Temperatura y Humedad del aire, Precipitaciones, Color.	Humedad en tierra, Iluminación, Radiación ultravioleta y Color.	Humedad en tierra, Precisión, Cámara.
Almacenamiento	Memoria de 16 GB.		
Comunicación	El dispositivo de comunicación debe permitir el envío de información, como mínimo, la distancia entre plantas de 1,25 mts. de forma inalámbrica.		
Fuente energía	Para el correcto funcionamiento de los sensores es necesario adecuar una fuente constante de energía que evite la pérdida de información momentánea y pueda movilizarse a una zona sin conexión a corriente.		

3. Ergonómicos: Las características físicas del dispositivo están delimitadas por la posibilidad de uso en el entorno de trabajo. A partir de los requerimientos electrónicos y agronómicos establecidos anteriormente, se observan condicionantes de producción del artefacto que permitan viabilizar la seguridad y funcionamiento de los componentes internos para diseñar su forma como lenguaje y delimitante de utilización. Para la ubicación del dispositivo, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Sensores móviles: para facilitar la recolección de datos más precisos, los sensores de iluminación, radiación ultravioleta y lluvia deben poderse extender, orientar y fijar según las condiciones de la planta.
- Sensores enterrados: para medir la humedad del suelo, el portador del sensor debe enterrarse en terreno a una profundidad y ángulo determinado por la acción del usuario.
- Sensores atados a las hojas: para detectar el color de las hojas el sensor debe estar en contacto con estas, requiriendo extensión del componente, orientación y fijación precisa dando seguridad al usuario.
- Sensores ubicados en la copa de la planta: para obtener datos precisos y reducir el error, los sensores de iluminación, radiación ultravioleta y lluvia deben estar ubicados en la copa de las plantas con la consecuente ubicación y fijación.
- Sensores expuestos a la luz: Iluminación, radiación ultravioleta y color.

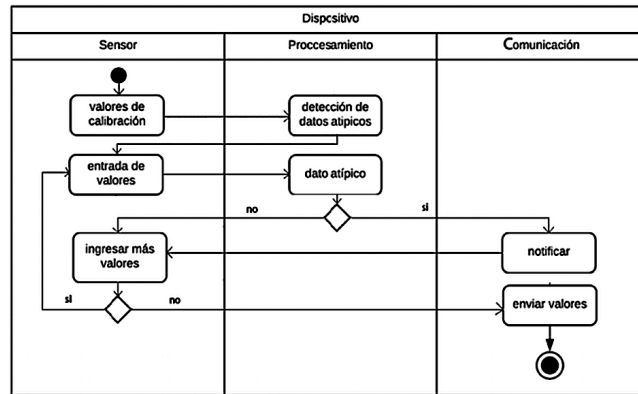


Figura 3. Requerimientos Lógicos.

- f) Sensores expuestos al agua: sensor de precipitaciones. Exige posibilidad por parte del usuario de orientarse, ubicarse y fijarse. Al igual que algunos de los sensores no pueden verse expuestos al agua pues puede presentarse daños en estos.
4. Lógicos: El sistema lógico diseñado para los dispositivos diseñados, que permite la correcta recolección de datos, se muestra en la Fig. 3.

3.3. Diseño de dispositivos

A partir de los requerimientos relacionados anteriormente se materializa la estructura, factibilidad productiva, usabilidad y fiabilidad de los dispositivos de medición. Ver Fig. 4.

4. Conclusiones y Trabajo Futuro

Se identificaron requerimientos agronómicos, electrónicos, ergonómicos y lógicos específicos para el monitoreo de plantas de café, los cuales viabilizaron el diseño de tres dispositivos para agricultura de precisión donde estos constan de diferentes sensores para la recolección de variables.

Estos brindarán información sobre la planta desde sus partes físicas en terreno, y consecuentemente del conjunto de plantas componentes de un cultivo. La ergonomía del dispositivo se pensó en pro de ser usada sin afectar el desarrollo de la planta y sea posible adaptarla a cada una de sus características. La selección de sensores, ubicación y disposición de los mismos aumentan la precisión de los datos a obtener y favorecen el tener diferentes posibilidades para analizar la información.

El diseño de los tres dispositivos de medición permitirá el desarrollo de tecnología especializada para monitoreo de cultivos de café, proporcionando información precisa y útil a los agricultores para facilitar la toma de decisiones y con esto aumentar la producción.

Referencias

1. Anacafé: Poda de café, una buena alternativa para mantener cafetales jóvenes y productivos. Creación de Capacidades en Asistencia Técnica a Productores de Café en Guatemala (2015)
2. Andres, O., Carlos, R.: Diseño e implementación de un prototipo de estación meteorológica con telemetría para análisis energético solar y eólico. Master's thesis, Universidad de Nariño (2015), <http://biblioteca.udenar.edu.co:8085/atenea/biblioteca/91038.pdf>
3. Arakeri, M.P., Kumar, B.P.V., Barsaiya, S., Sairam, H.V.: Computer vision based robotic weed control system for precision agriculture. In: Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2017 International Conference on. IEEE (Dec 2017), <https://ieeexplore.ieee.org/document/8126005/>
4. Civil, A.: Requisitos generales de aeronavegabilidad y operaciones para RPAS. Circular Reglamentaria No 002. Aeronautica Civil (Jul 2015)
5. Colombia, F.N.D.C.D.: Descripción del proceso productivo y del beneficio el café. Guía ambiental para el sector cafetero 2, 51–60 (2010)
6. Colombia, F.N.D.C.D.: Nuestras regiones cafeteras. La tierra del café (2010)
7. Corpoica, Minagricultura: Plan estratégico de ciencia, tecnología e innovación del sector agropecuario colombiano (2017 -2027) (2016), ministerio de Agricultura
8. García, M., López, P.A.N., Carlos, J.: Diseño de un modelo de agricultura de precisión utilizando drones y un sistema de captura, almacenamiento y análisis de datos que permita identificar a tiempo la generación de la pudrición del cogollo en cultivos de palma de aceite que se encuentran en los departamentos de bolívar y santander. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, tepsitorio Institucional, Especialización en Gestión de Proyectos de Ingeniería (2017), <http://hdl.handle.net/11349/6306>
9. Grano, A.: El sector cafetero es motor de la economía y garantía de estabilidad y paz social. In: LXXIX Congreso Nacional de Cafeteros, Por una Caficultura Competitiva (2013)
10. Honrado, J.L.E., Solpico, D.B., Favila, C.M., Tongson, E., Tangonan, G.L., Libatique, N.J.C.: Uav imaging with low-cost multispectral imaging system for precision agriculture applications. In: Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). IEEE (2017), <https://ieeexplore.ieee.org/document/8239328/>
11. López, J.E.G., Chavez, J.C., Sánchez, A.K.J.: Modelado de una red de sensores y actuadores inalámbrica para aplicaciones en agricultura de precisión. In: Humanitarian Technology Conference (MHTC). IEEE Mexican (May 2017), <https://ieeexplore.ieee.org/document/7926210/>
12. Pulgarín, J.A.: Sistemas de producción de café en colombia, chap. Densidad de siembra y productividad de los cafetales, pp. 132–143. Cenicafe (2010)
13. Pérez, Y.R.: Red de sensores inalámbricos para el cultivo de la uva en la provincia de Granma. Master's thesis, Universidad central Marta Abreu de las Villas (2017), <http://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/8216>
14. Ramírez-Builes, V.H., Álvaro Jaramillo-Robledo, Arcila-Pulgarín, J., Montoya-Restrepo, E.C.: Estimación de la humedad del suelo en cafetales a libre exposición solar. Cenicafe 63(3), 252–261 (2010)
15. Srbínovska, M., Gavrovski, C., Dimcev, V., Krkoleva, A., Borozan, V.: Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. Journal of Cleaner Production 88, 297–307 (2015), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614003916>

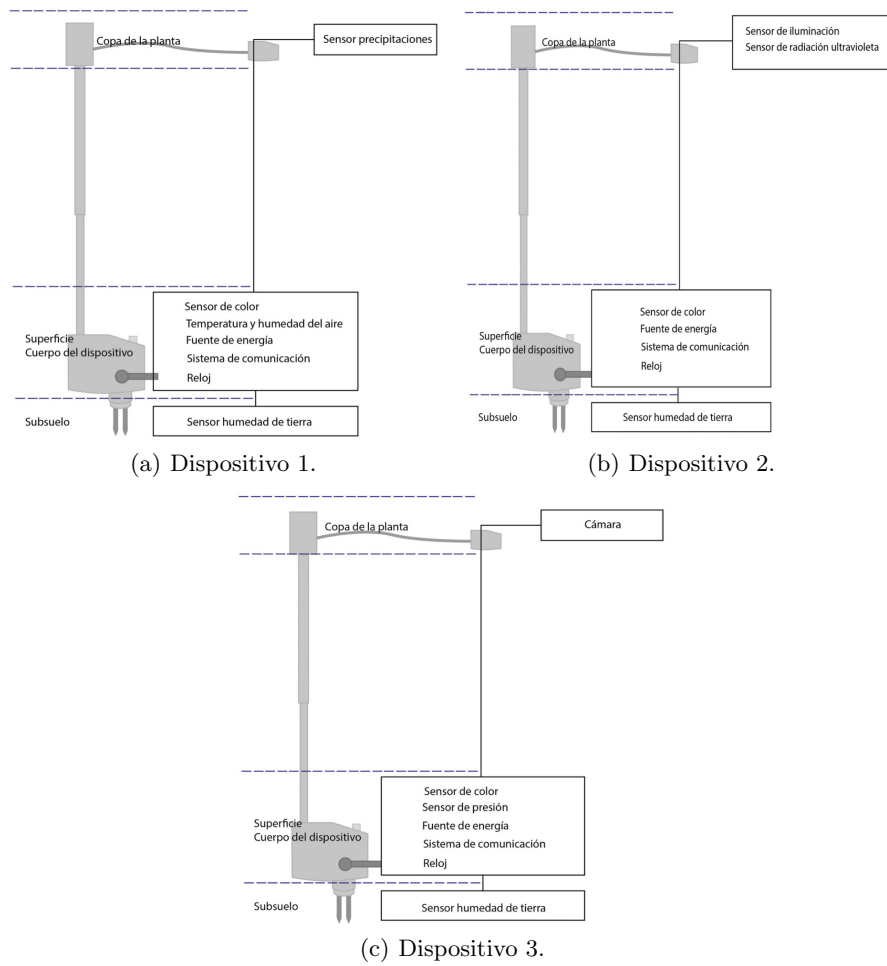


Figura 4. Diagrama funcional de los dispositivos.