

Modelo a escala de un sistema de riego automatizado, alimentado con energía solar fotovoltaica: nueva perspectiva para el desarrollo agroindustrial colombiano

Scale model of an automated irrigation system, powered by solar photovoltaic energy: a new perspective for colombian agroindustrial development

FLOR GARCÍA MORENO

Tecnóloga Eléctrica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Bogotá, Colombia.

Contacto: *flormoga15@gmail.com*

JUAN BEDOYA FIERRO

Tecnólogo Eléctrico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Bogotá, Colombia.

Contacto: *sebastianbedoya@live.com*

GERMÁN ARTURO LÓPEZ MARTÍNEZ

Magíster en Ingeniería Mecánica. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Contacto: *galopezm@udistrital.edu.co*

Fecha de recepción: 15 de agosto de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 1 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Palabras clave: automatización, energía solar, gestión de recursos, recursos naturales, riego.

Key words: Automation, solar energy, resources management, natural resources, irrigation.

RESUMEN

En este artículo se describe el procedimiento seguido del diseño e implementación de un modelo a escala del sistema de riego automatizado alimentado con energía solar foto-voltaica, diseñado para una finca ubicada en una zona cálida de Colombia. Este modelo fue instalado en la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, con el propósito de comprobar su funcionamiento desde las condiciones climáticas de Bogotá. El sistema de control se plantea con base en la plataforma de programación y automatización Arduino, donde se miden, integran y procesan señales analógicas que conforman el sistema automatizado, y se responde a las necesidades de riego en la finca seleccionada, o de cualquier otra del sector agrícola, donde el abastecimiento de energía eléctrica es escaso, pero donde se dispone de recursos hídrico y solar suficientes para suplir las necesidades, tal como sucede en este caso. Es así como el sistema suple y regula necesidades

de orden agronómico, hidráulico y fotovoltaico, propias de una finca agrícola colombiana.

ABSTRACT

This article describes the procedure followed in the design and implementation of a scale automated irrigation system model powered by photovoltaic solar energy, designed for a farm located in a hot area of Colombia; which was installed at the Technology Faculty of Francisco José de Caldas University, in order to check its performance under the climatic conditions of the Bogota city. The control system is proposed on the basis of programming and automation platform Arduino, which measured, integrate and process analog signals that make the automated system, and responds to the needs of selected farm irrigation, or any other for agricultural sector where electricity supply is scarce, but solar and water resources are available sufficient to supply the needs, such as in this particular case. Thus the system supplies and regulates the agronomic, hydraulic and photovoltaic needs for any Colombian farm.

* * *

INTRODUCCIÓN

En el ámbito mundial, la actividad agrícola de producción de alimentos requiere, entre muchos aspectos, el suministro de recursos básicos como agua y energía eléctrica. Para esto se han desarrollado diversos sistemas con variadas tecnologías para garantizar su obtención y distribución. Por otro lado, la creciente demanda alimenticia exige, cada vez más, al sector agrícola una mayor producción en un menor tiempo, por lo que desde hace varios años se han implementado sistemas de riego que permiten un uso más racional del agua con niveles de desarrollo óptimos, en los cultivos donde se implementen. Se han perfeccionado dispositivos que permiten automatizar este proceso, pero a costa de un aumento de la deman-

da de energía eléctrica, en áreas rurales que no siempre cuentan con una red de energía eléctrica cercana y que usualmente esta es suplida con plantas generadoras diésel, como es el caso típico en Colombia.

En este proyecto se plantea el diseño de un sistema de bombeo y riego automatizado, usando como fuente energética la energía solar fotovoltaica, en una finca productora de aguacates, ubicada en la población de Armero (Tolima), con el fin de contar con una solución sustentable que mejore el rendimiento de la actividad agrícola en este sector del país.

Para el diseño fue necesario determinar la cantidad de agua por regar a cada árbol de aguacate,

para determinar la cantidad mínima de agua por suplir en cada uno de los cuatro sectores en los que se dividió el área de cultivo, (subunidades) con el fin de organizar el sistema de riego de manera parcializada, en especial durante la temporada de sequía, que corresponde a la época de mayor demanda del recurso hídrico. Se tuvo en cuenta el fenómeno de la sequedad de la tierra, el cual depende del proceso natural denominado evapotranspiración, que también fue calculado a partir de factores ambientales como el nivel de precipitación, la temperatura ambiente y la humedad relativa, datos suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam) (Ideam, 2012), el cual también suministró el dato de la disponibilidad del recurso hídrico del río que circunda la finca seleccionada. A partir de esta información, se hizo el diseño hidráulico con el cálculo de las cabezas (cargas) dinámicas, estáticas y de presión en la red de tuberías necesaria para el sistema de riego, el cual contempla desde los emisores o inyectores de agua, hasta el cabezal del riego donde se instala el sistema de bombeo, (electrobombas) y cuyo consumo energético es suplido por el sistema fotovoltaico seleccionado.

El sistema de automatización depende de la humedad de la tierra y ejerce un mejor control en la frecuencia y dosificación del riego, lo que permite el ahorro de energía y costos de operación. Con el modelo a escala se busca demostrar el funcionamiento que se esperaría tener en el modelo real, controlando la puesta en marcha de elementos que dependen de un programador, como son las electroválvulas y electrobombas del sistema de riego. Para la programación del sistema se usó la plataforma de programación Arduino, que es un *software* libre.

En cuanto a la selección y estimación de la eficiencia del panel solar instalado en el modelo a escala, se realizó un registro estimado de la potencia entregada durante un año y se comparó con

los datos de radiación solar medida del sector, suministrados por el Ideam.

METODOLOGÍA

El diseño del sistema consta de dos partes, la primera corresponde al diseño del sistema a escala real, y la segunda al diseño del sistema de riego automatizado a escala.

Diseño sistema a escala real

La finca objeto de estudio tiene un cultivo compuesto por 504 árboles de aguacates, distribuidos en 2,8 ha; presenta una deficiencia de riego en enero, febrero, junio, julio y agosto, periodos que corresponden a los meses de máxima sequía y máxima radiación solar con promedios mensuales que alcanzan los 14,76 [MJ/m²] (Upme, 2005). Adicionalmente, no está conectada al sistema de interconexión nacional y la red eléctrica más cercana se encuentra a más de dos kilómetros de distancia. La figura 1 representa un esquema del cultivo de aguacates al que se le diseña el sistema de riego.

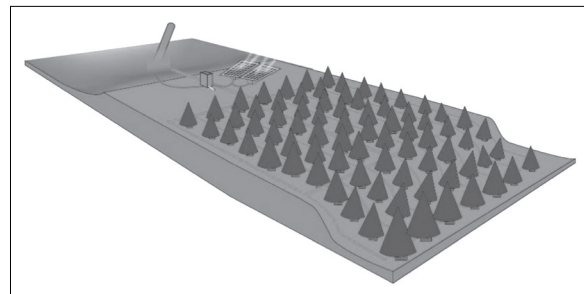


Figura 1. Esquema del cultivo por diseñar el sistema de riego

Fuente: Bedoya, Moreno (2013).

Cálculo agronómico

El agua requerida por cualquier cultivo es equivalente a la evapotranspiración que que este experimenta. El cálculo de evapotranspiración potencial

investigación

(Odnuplay y Fao, 2006) se realizó mediante la ecuación (1), y sus resultados se compararon con la precipitación hídrica de la zona. Se obtuvo el balance hídrico, presentado en la figura 2, donde se observa la necesidad de agua por el sistema de riego para cada árbol, desde diciembre hasta febrero, y desde junio hasta agosto.

$$ET_p = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

Donde:

ET_p : evapotranspiración potencial [mm/día].

Rn : radiación neta en la superficie del cultivo [MJ/m² día].

G : flujo de calor en el suelo [MJ/m² día].

T : temperatura media [°C].

U_2 : velocidad del viento media a 2 m de altura [m/s].

e_s : presión de vapor de saturación [kPa].

e_a : presión real de vapor [kPa].

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C].

γ : constante psicrométrica [kPa/°C].

Para el desarrollo se empleó información de la estación meteorológica más cercana a la finca, donde se contó con un promedio de datos tomados durante los últimos 20 años. Esta información se le compró al Ideam. También fue necesario recurrir al mapa de radiación solar global elaborado por la Upme.

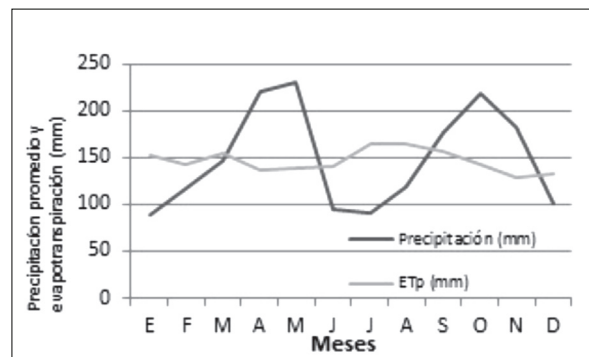


Figura 2. Balance hídrico y requerimiento de agua

Fuente: elaboración propia.

Diseño hidráulico

Los sistemas de bombeo usan energía solar fotovoltaica y suplen la carga o cabeza dinámica total, la que debe ser cubierta por la bomba de extracción del agua del río hasta el lugar destinado para su almacenamiento (tanque de suministro). Para el sistema de riego se seleccionaron unos emisores de agua (goteros) que garantizan una aplicación de riego uniforme; en el cálculo del caudal se tuvo en cuenta la insolación más crítica en la finca, la que corresponde a 6,5 horas pico/día en agosto. Este es el tiempo que se tomó como referencia para realizar el riego, con el propósito de determinar la potencia de la planta de generación foto-voltáica.

Cálculo de la carga total dinámica

Para hallar la carga total dinámica que debe suplir la electrobomba se estudiaron las cargas y pérdidas de cada uno de los cuatro sectores en los que se dividió la granja (dos sectores iguales de 88 [m] y otros dos de 80 [m] de longitud), para el sistema de riego por goteo, según se muestra en la figura 3. Posteriormente, se calculó la carga dinámica total con la ecuación (2) (Fmpln-wwf, 2009).

$$H_b = H_t + \sum H_{fs} + \sum H_{fp} + \sum H_{floc} \pm \Delta EL \quad (2)$$

H_b : carga total en la bomba [m].

H_t : carga requerida en la entrada de la tubería terciaria [m].

$\sum H_{fs}$: suma de las pérdidas por fricción en todos los tramos de la tubería secundaria [m].

$\sum H_{fp}$: suma de las pérdidas por fricción en todos los tramos de la tubería primaria [m].

$\sum H_{floc}$: suma de las pérdidas por fricción localizadas de los demás dispositivos del sistema de riego (reguladores de presión, uniones, codos, etc.) [m].

ΔEL : diferencia de cotas entre los extremos de la tubería [m].

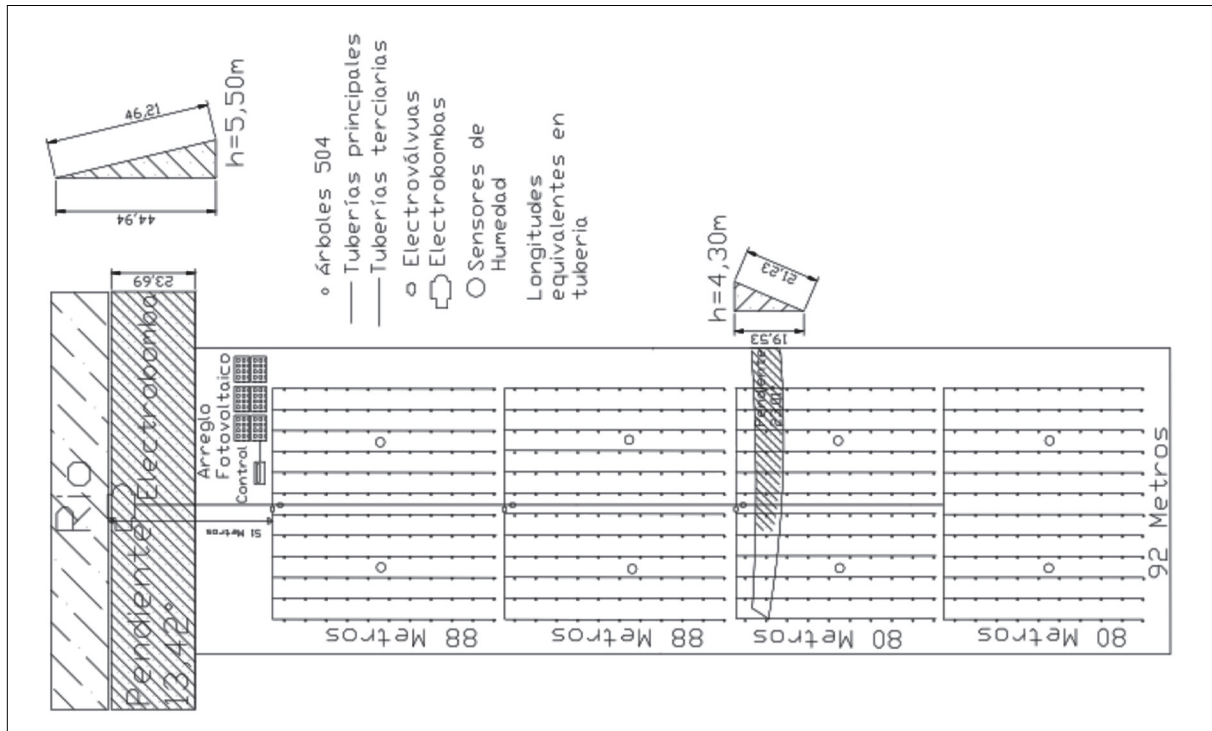


Figura 3. Diseño hidráulico en los cuatro sectores donde fue dividida la finca.

Fuente: Bedoya, Moreno (2013).

Tabla 1. Diseño hidráulico

Sector	Presión requerida [m]	Distancia al río [m]	Diámetros de ductería [mm]		
			Laterales	Terciaria	Primaria
1	13,10	51	18	50	96
2	13,39	139	18	50	96
3	14,38	227	16	50	96
4	15,01	307	16	50	96

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 1 se aprecia que el sector más alejado del río es el de mayor requerimiento de presión y que corresponde a una cabeza hidráulica de 15,01 m.

Diseño fotovoltaico

Los componentes más importantes, al igual que el procedimiento de cálculo del sistema de bombeo empleando energía solar, corresponden a las sugerencias realizadas por una guía para el desarrollo de proyectos de este tipo de tecnología (Sandia National Laboratories, 2001); los elementos constitutivos (arreglo foto-voltaico, controlador, bomba, y tanque de almacenamiento o suministro) están representados en la figura 4. La característica esencial de estas electrobombas solares es que están diseñadas para trabajar con diferentes rangos de potencias, dependiendo de la radiación que incide sobre los paneles. A partir de la selección de la electrobomba se calcula la cantidad de paneles solares para la generación de la potencia requerida.

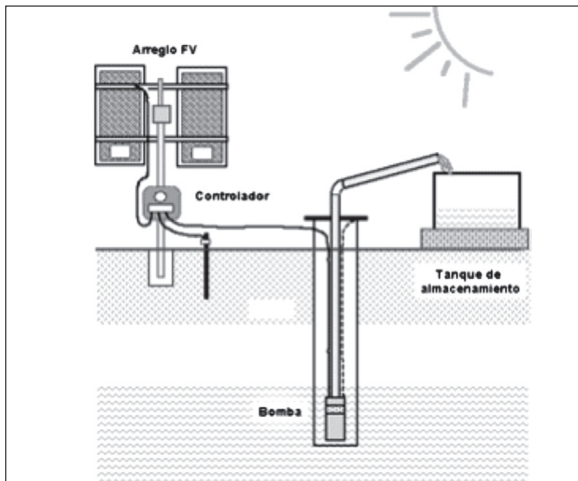


Figura 4. Componentes de un sistema de bombeo típico que usa energía solar fotovoltaica

Fuente: Sandia National Laboratories (2001).

Selección de la electrobomba

A partir del caudal diario calculado para un día agosto (120,960 litros/día) y de la carga dinámica total, se seleccionó la electrobomba de la tabla 2.

Tabla 2. Datos técnicos

Electrobomba seleccionada	
Marca	Lorentz
Modelo	PS 1800 C - SJ17 - 2
Tipo de bomba	Centrifuga sumergible
Tipo de motor	DC sin escobillas
Voltaje de operación (ca/cc)	102
Eficiencia	53 %

Fuente: elaboración propia.

Arreglo fotovoltaico

Se inicia el cálculo del arreglo fotovoltaico a partir de la energía hidráulica (E_h), que corresponde a 4,94 [kWh/día].

En seguida se calcula la energía eléctrica necesaria para alimentar el sistema de bombeo y se calcula con la ecuación (3).

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{eb}} \quad (3)$$

La energía eléctrica calculada es de 9,33 [kWh/día]. Ahora, se calcula el área necesaria por el arreglo fotovoltaico para producir la energía eléctrica requerida por el sistema y se basa en la ecuación (4).

$$A = \frac{E_h}{\eta_{fv} \cdot H_{dm}} \quad (4)$$

Donde η_{fv} es el rendimiento fotovoltaico que depende del rendimiento del módulo (η_m) y el acoplamiento entre el generador y la electrobomba. Para el diseño adecuado de un sistema se considera un factor de acoplamiento de 0,8 (De Juana, 2003), el rendimiento del módulo seleccionado es de 14,74 % y el rendimiento fotovoltaico (η_{fv}) es de 11,79 %. El área necesaria del arreglo fotovoltaico es de 19,56 m².

Finalmente, la potencia pico del arreglo fotovoltaico se calcula con la ecuación (5) (Sandia National Laboratories, 2001)

$$P_p = \eta m \cdot A \cdot 1000 \quad (5)$$

Por lo anterior, la potencia del arreglo fotovoltaico requerido es de 2,844 [kW].

En la tabla 3 se presentan los principales datos técnicos del arreglo fotovoltaico. Hay una diferencia de 33,76 [W] entre el generador requerido y el generador calculado, debida a que se buscó la configuración que estuviera más cercana y que no excediera de gran manera la potencia del arreglo fotovoltaico requerido.

Tabla 3. Arreglo fotovoltaico

Tamaño del arreglo fotovoltaico [W]	2877,76
Potencia cada módulo[W]	240,0
Voltaje Vmp del módulo [V]	29,21
Corriente Imp del módulo [A]	8,21
Total de módulos	12
Módulos en paralelo	3
Módulos en serie	4
Voltaje del arreglo [V]	116,84
Corriente del arreglo [A]	24,63
Área del módulo [m]	1,63
Área total [m]	19,56

Fuente: elaboración propia.

Diseño y construcción del modelo por escala automatizado

Con el objetivo de reproducir de manera fiel el funcionamiento del sistema de riego propuesto para la finca y para poder estudiar su comportamiento de una manera controlada y económica se diseñó y construyó un modelo a escala reducida. Los dos sistemas pretenden maximizar su rendimiento al disminuir la intervención humana y garantizar una mejor administración de los recursos disponibles, como son la energía solar y el agua.

Para el diseño del sistema de riego en el cultivo real se requieren datos de variables ambientales como la humedad de suelo y la temperatura; esto con el fin de decidir por cuánto tiempo y qué cantidad de agua se debe suministrar a las plantas, según su requerimiento; en el caso del sistema a escala real se trata de árboles de aguacate (Fm-pln-wwf, 2009). A partir de esta información, y teniendo en cuenta las condiciones del sistema proyectado en cuanto a la instalación en el terreno, se requiere que el sistema active los diferentes actuadores (sistema de suministro de agua) por medio de la energización de los componentes necesarios para cada caso (electroválvulas y electrobomba). Vale la pena aclarar que el modelo a escala se construyó con los mismos dispositivos y sensores seleccionados en el modelo real.

Descripción del sistema automatizado del modelo a escala

En la figura 5 se presentan los dispositivos usados para el sistema de riego automatizado y alimentado con energía solar fotovoltaica.

Quedan por mostrar los tubos, mangueras y acoples del sistema hidráulico de riego.

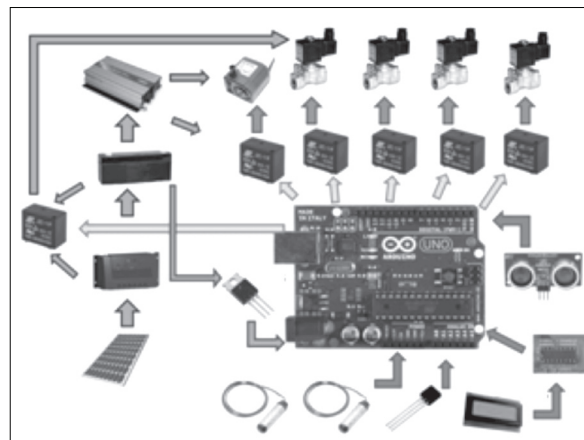


Figura 5. Diagrama general de los elementos del sistema automático de riego a escala

Fuente: elaboración propia.

investigación

La humedad del suelo se mide con un sensor de humedad de suelo Watermark, el nivel del tanque de suministro se realiza con un sensor de ultrasonido Ping Parallax y la temperatura ambiente, con un sensor de temperatura LM35.

Estas señales son las entradas transferidas al microcontrolador Atmega 328 de la tarjeta Arduino Uno R3 para procesar una serie de instrucciones que definen los tiempos de activación de los relés que energizan cuatro electroválvulas y una electrobomba.

El esquema cíclico presentado en la figura 6 indica el proceso general del programa.

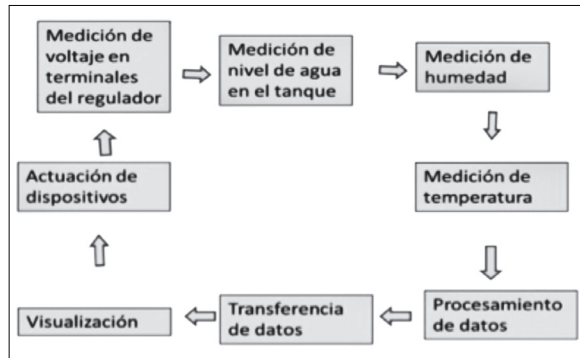


Figura 6. Proceso general del programa

Fuente: elaboración propia.

La fuente generadora de energía es un panel solar conectado a un regulador de carga que adecúa el voltaje entregado al sistema. Los dispositivos electrónicos funcionan con corriente directa y están conectados a una batería cuya carga es administrada por el regulador. Para el caso de la electrobomba, que funciona con corriente alterna, se cuenta con un inversor de corriente (DC/AC). En la figura 7 se presenta una fotografía de los dispositivos seleccionados: 1. panel solar, 2. regulador, 3. inversor, 4. batería, 5. tarjeta controladora, 6. electrobomba, 7. sensor de temperatura LM35, 8. sensor de humedad Watermark SS, 9. sensor de ultrasonido Ping Parallax, 10. electroválvulas.

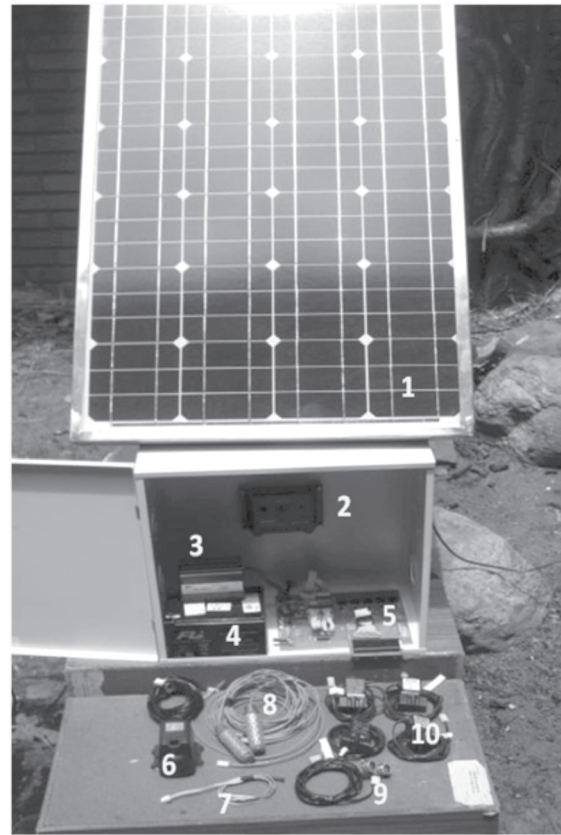


Figura 7. Fotografía con la conformación de los sistemas de potencia solar fotovoltaica y control de riego

Fuente: elaboración propia.

Componentes del sistema fotovoltaico

Panel solar: es la fuente de generación de energía; su potencia nominal es de 60 [W] y su voltaje nominal es de 12 [V]. Es un panel monocristalino marca Erasmus, con una eficiencia aproximada de 14,23 %.

Regulador de carga: cumple la función de regular la tensión del sistema a 12 [Vdc]; también protege la batería de descargas profundas y sobrecargas, y soporta una corriente máxima de 6 [A].

Inversor de corriente: su entrada es de 12 [Vdc], con salida de 115 [Vac], su potencia nominal es

de 100 [W] y se usa para la alimentación de la electrobomba.

Batería: batería seca, libre de mantenimiento; su capacidad es de 5 amperios/hora; funciona a 12 [Vdc]. Se usa para ofrecer alimentación continua y sin fluctuaciones a todas las cargas del sistema de riego.

Componentes del sistema de control del riego

Tarjeta Arduino Uno R3: plataforma programación de *software* libre, seleccionada para la automatización del sistema de riego, que por su entorno amigable simplificó la ejecución del proyecto. Se basa en una placa con el microcontrolador Atmega 328, cuenta con 6 pines de entrada análogas y 14 pines digitales de los cuales 6 son compatibles con señales PWM, convertidor análogo digital y se pueden adecuar dispositivos que funcionan con el bus de comunicaciones I2C (Uco, 2009). Se alimenta con 9 [Vdc] obtenidos por un regulador 7809 conectado directamente a la batería, cuyo voltaje nominal es de 24 [Vdc] y se conecta entre un puente de condensadores. Soporta corrientes de hasta 1 [A].

Los dispositivos de entradas del sistema se describen a continuación:

Sensor de humedad de suelo: es un sensor de matriz granular (GMS) Watermark 200SS fabricado por Irrometer, usado y patentado desde 1978. Es un sensor de tipo resistivo que sirve para calcular la tensión matricial del suelo. Cuenta con dos electrodos de material anticorrosivo rodeados de material granular (yeso) que puede ser un buen conductor eléctrico, dependiendo de la humedad presente en él. Con las mediciones obtenidas por el sensor se puede calcular el potencial de agua en el suelo (SWP, Soil Water Potencial). Se seleccionó por su facilidad de uso, larga durabilidad y libre mantenimiento (Campbell Scientific Inc., 2000 y Watermark, 2001).

Sensor de ultrasonido Ping Parallax: es usado para la medición de nivel de agua en el tanque; genera una señal de ultrasonido, cuyo tiempo de regreso es proporcional a la distancia recorrida. La señal arrojada por el sensor de ultrasonido es PWM. Este sensor detecta la presencia de agua e impide el funcionamiento de la electrobomba en seco.

Sensor de temperatura LM35: dispositivo semiconductor usado para registrar la temperatura del ambiente, la señal generada es análoga.

La alimentación de los dispositivos de salida está controlada por la actuación de relés de 5 [V], los cuales a su vez dependen de señales digitales que pueden ser de 1 o 0 (5 [V] o 0 [V] respectivamente), por periodos definidos por el microcontrolador.

Electrobomba: la electrobomba seleccionada para el modelo a escala es de 8 [W] de potencia, funciona a 110 [Vac], su caudal es de 600 [l/h] y tiene una presión máxima de 1 [m].

Electroválvula: electroválvula solenoide de 7 [W], es una electroválvula de doble vía. Su diámetro nominal es de ¼” y su alimentación es a 12 [Vdc]. Controla el paso de agua para el suministro de las plantas.

Comunicación con el usuario: para la visualización de información proveniente del microcontrolador se usa un *display* de pantalla líquida de 16x2 conectado a través del dispositivo PCF8574, que es un puerto de 8 bit y convierte el protocolo serial del *display* a I²C para simplificar la comunicación con la tarjeta Arduino.

Medición e interpretación de los datos

Obtención de datos

Para la obtención del SWP en cada sector se plantea un divisor de tensión con una resistencia

investigación

auxiliar de valor comparable a la del sensor de humedad Watermark, que actúa como una resistencia variable, alimentado con 5 [V] generados por la tarjeta Arduino.

El potencial de agua en el suelo se calculó (SWP) con la ecuación (6) (Oregon State University, 2005).

$$SWP = (0,07407 \cdot R_{21}) - 0,03704 [cb] \text{ o } [kPa] \quad (6)$$

El valor calculado da de 0 a 200 [cb] o [KPa]; esta medida se asocia de manera porcentual con la falta de humedad en el suelo (Odnuplay, 2006). Luego, dependiendo del tipo de planta se toma como base aquellas que requieran en “L” litros de agua al día y que se riegan en “S” segundos; se calcula la cantidad de agua y el tiempo de riego

para cada planta según las ecuaciones (7) y (8) respectivamente.

$$Aguaardegar = \frac{L}{Porcentajedefaltadehumedad} [litros] \quad (7)$$

$$Tiempoderiego = \frac{Aguaardegar \cdot s}{L} [s] \quad (8)$$

La medición de temperatura ambiente y de distancia para conocer el nivel del tanque se hace directamente.

Programación

La puesta en marcha del modelo a escala se basa en el diagrama de flujo mostrado en la figura 8, el cual permite el riego a partir de 100 cb para evitar la saturación de la planta y controlar desperdicios de agua y energía.

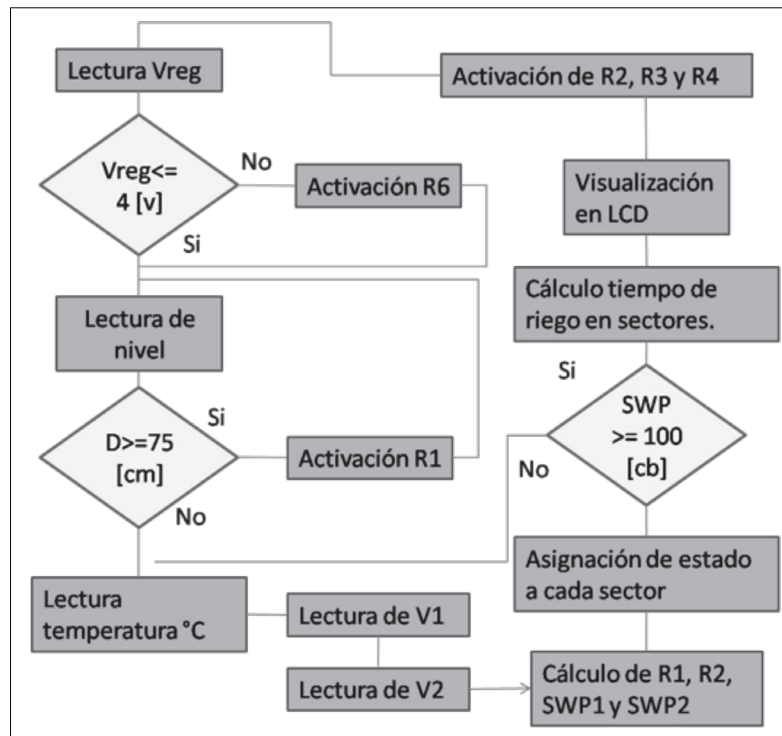


Figura 8. Diagrama de flujo del programa empleado

Fuente: elaboración propia.

Pruebas y resultados

Se tomaron mediciones de la variación de la resistencia y del voltaje en los terminales de los sensores Watermark para estimar el tiempo de

respuesta a cambios de humedad, como se muestra en las figuras 9 y 10 respectivamente, disponiendo de 23 minutos para cambiar su estado de mayor humedad desde un estado seco.

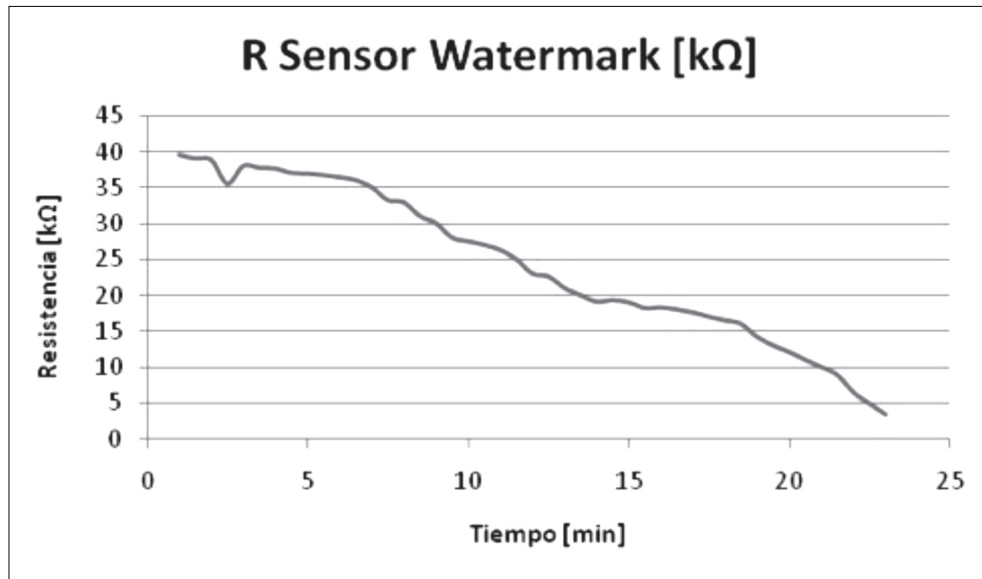


Figura 9. Variación de la resistencia en el tiempo

Fuente: elaboración propia.

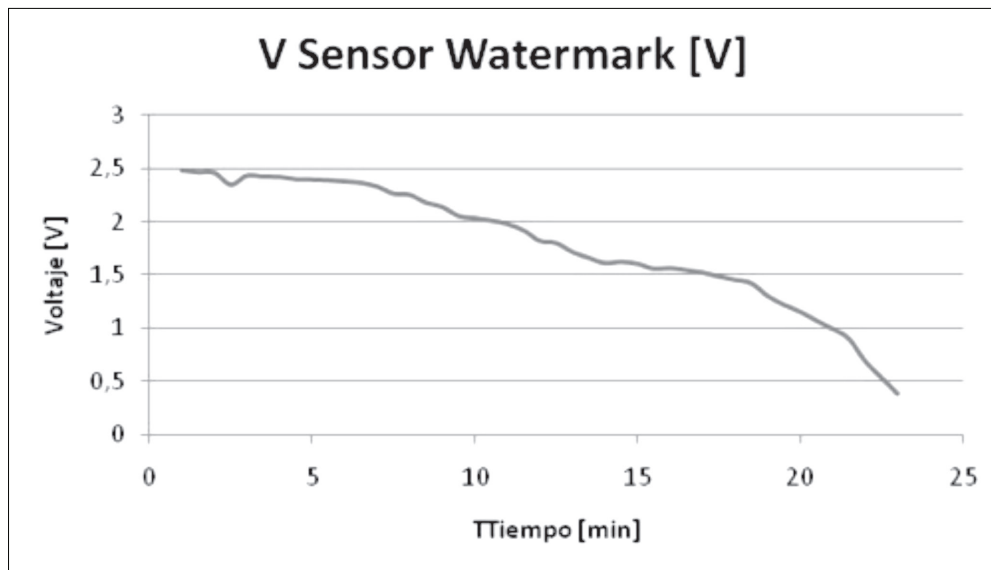


Figura 10. Variación del voltaje en el tiempo

Fuente: elaboración propia.

investigación

Para obtener mediciones de humedad exactas se tiene en cuenta la temperatura del suelo; sin embargo, para el modelo a escala se toma la temperatura ambiente cercana a la planta.

Se estimó el SWP para temperaturas fijas de 20 [°C] y 25 [°C] comparando los resultados obtenidos con el modelo lineal usado para la

programación y un modelo no lineal propuesto en 1998 por Shock (Chard, 2005), que se basa en la ecuación (9). Se seleccionó el método de linealización más adecuado (Watermark, 2001), presentado en la figura 11.

$$SWP = \frac{Rsh}{0,0136 * (1,062 * (34,2 - Ts + (0,010 * TS^2)) - Rs)} \cdot 0,01 \text{ [cb]} \quad (9)$$

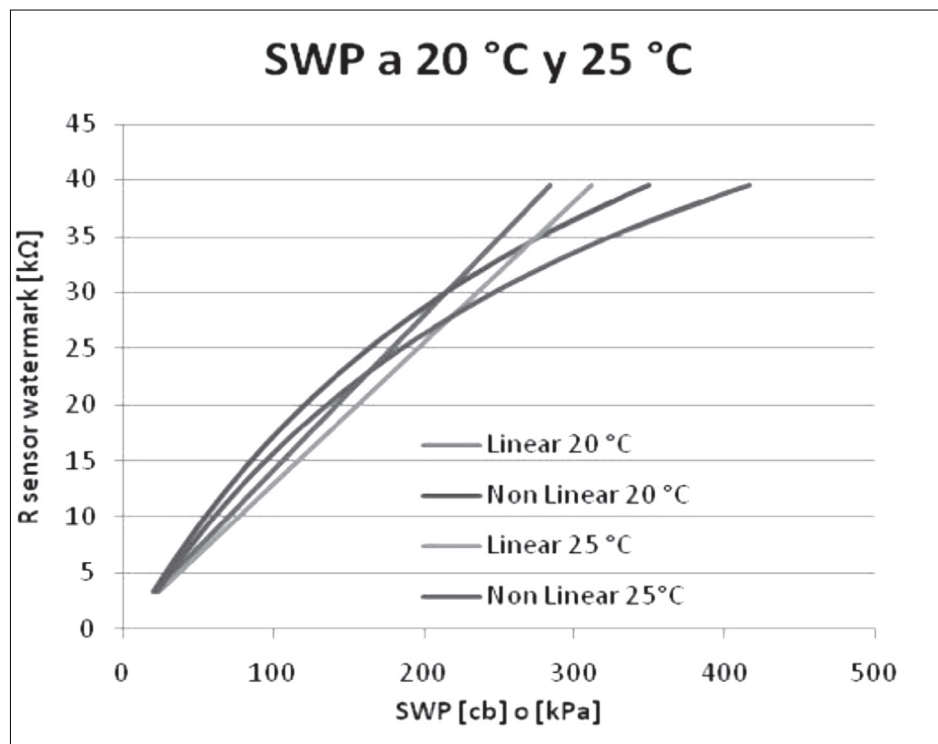


Figura 11. SWP a 20[°C] y 25[°C].

Fuente: elaboración propia.

Se realizó una prueba en la que se ejecutaron tres tomas durante 5 minutos, con 25 lecturas cada 12 segundos, adquiridas y procesadas por la tarjeta Arduino. En la primera toma el sensor uno está más húmedo que el sensor dos, como se evidencia en la gráfica de la figura 12; en la segunda toma el sensor uno es sometido a proceso de se-

cado hasta que llega al mismo punto del sensor dos; durante la tercera toma los sensores tienen el mismo nivel de humedad y las variaciones se producen por los cambios de temperatura del ambiente; por lo tanto, se comprueba que el sistema planteado es sensible a ligeros cambios en el entorno de la planta, ofreciendo confiabilidad en

las mediciones. Esta es la principal característica de un sistema de control eficaz, y específicamente en un riego programado se puede garantizar la dosificación de agua exacta sin arriesgar la salud

de la planta. Paralelo a esto, y a partir de pruebas y control de mediciones, el sensor de nivel actúa correctamente para impedir que la electrobomba trabaje en seco.

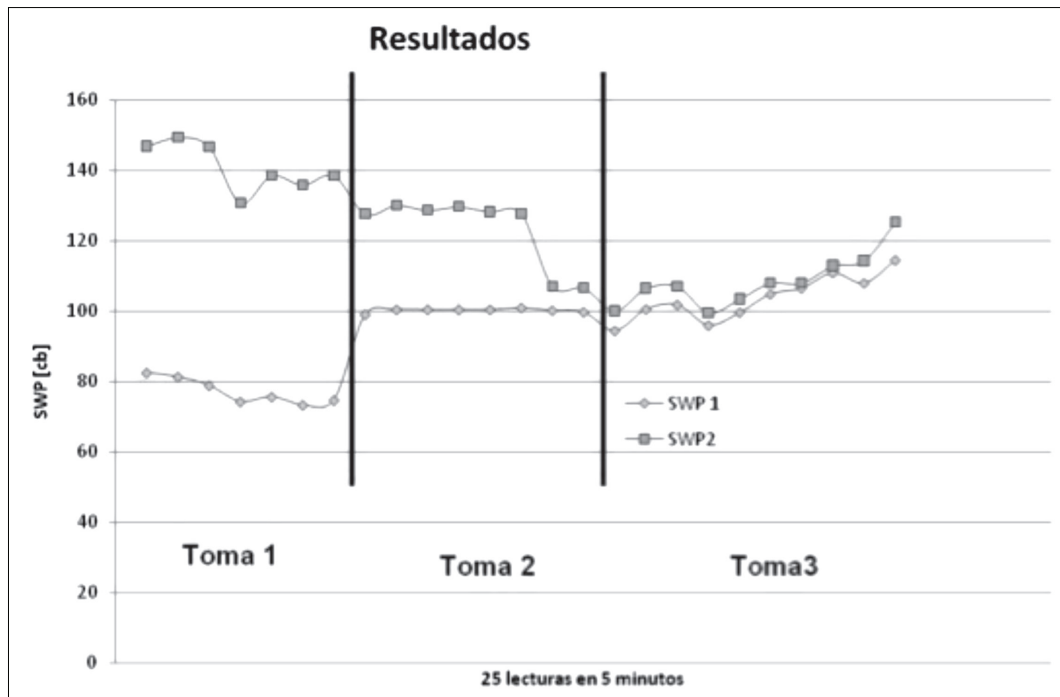


Figura 12. Pruebas de registro de SWP

Fuente: elaboración propia.

CONSTRUCCIÓN FINAL

Para la construcción del control para el riego programado se diseñó una PCB (*printed circuit board*), para la implementación de una tarjeta en la que se integró eléctricamente la alimentación y los dispositivos de entrada y salida (figura 14), basados en el plano eléctrico de la figura 15.

Se usan tres entradas análogas del Arduino para conectar dos sensores de humedad Watermark y uno de temperatura LM35; dos para la adaptación de la pantalla LCD y uno para el monitoreo de la alimentación. El sensor de ultrasonido Ping Pa-

rallax se conecta a un pin digital PWM y desde otros pines digitales se pueden controlar cinco relés que permiten energizar hasta cuatro dispositivos que funcionen con corriente continua y uno con corriente alterna, como las electroválvulas y la electrobomba, respectivamente.

Adicionalmente, cuenta con un puerto de corriente alterna conectado al relé de la electrobomba y tres puertos con corriente continua para la alimentación del Arduino, los cuatro relés mencionados anteriormente y un inversor, en caso de que este último no cuente con alimentación externa.

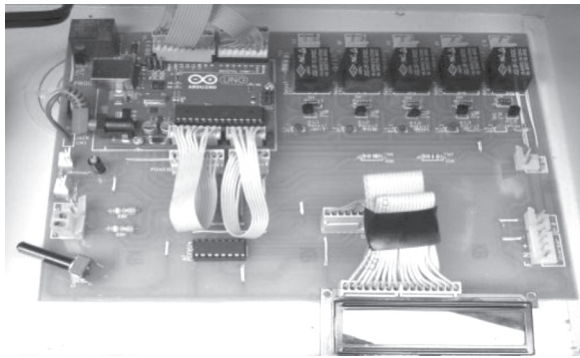


Figura 14. Fotografía de la tarjeta implementada

Fuente: elaboración propia.

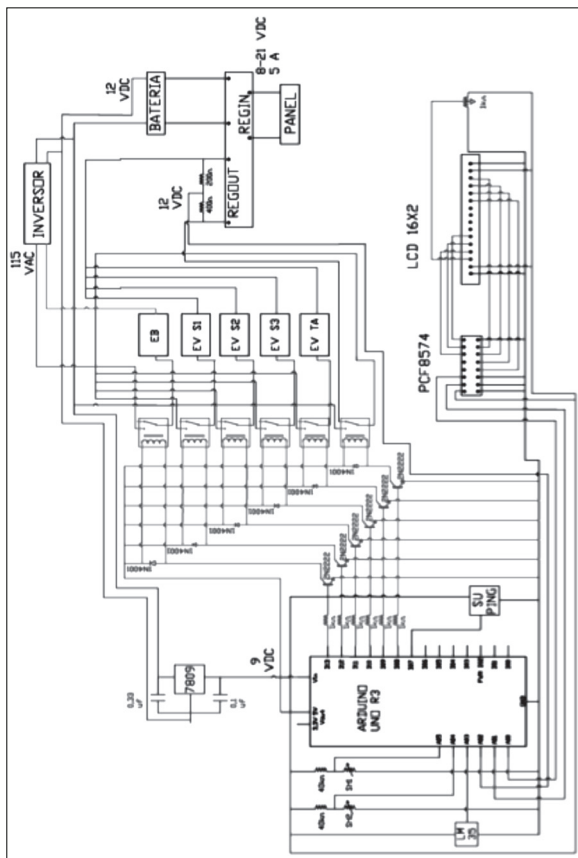


Figura 15. Plano eléctrico sistema de control

Fuente: elaboración propia.

Instalación en la Facultad Tecnológica

Se planteó la instalación del sistema de riego en la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital

Francisco José de Caldas, donde previamente se instaló el arreglo fotovoltaico para la iluminación del sitio. La necesidad por suplir es la dosificación diaria de agua a dos plantas, dado que consumen poco agua; esta se almacenará de forma manual.

Para esta instalación se usarán todos los sensores, dos electroválvulas y la electrobomba, como se puede ver en la figura 16.



Figura 16. Fotografía de las dos materas que simulan dos plantas de la plantación real, a las cuales se les pueden variar los contenidos de humedad de la tierra

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Los sensores de humedad seleccionados dan una correcta información, lo que permite asegurar el éxito de todo el sistema. A pesar de la exactitud de los sensores Watermark 200SS, es recomendable realizar pruebas adicionales para seleccionar el

método más adecuado para el cálculo del SWP ya que este puede tener variaciones de acuerdo con los diferentes tipos de suelo.

El ajuste de los sensores de humedad a partir de 100 cb evita la saturación de la planta y controla posibles desperdicios de agua y energía. Este tipo de ajuste, junto con todo el sistema de control implementado, garantiza un riego programado que permite la dosificación exacta de agua sin arriesgar la salud de las plantas.

Debido a los resultados obtenidos en las pruebas de control y medición realizadas al sensor de nivel de agua, permiten asegurar que este dispositivo ofrezca una garantía de protección adecuada que impide que la electrobomba trabaje en seco.

El sistema a escala funciona correctamente y esto permite asegurar que su implementación en la finca para la cual se diseñó brinde un funcionamiento apropiado.

REFERENCIAS

- Bedoya, J. y Moreno, F. (2013). *Diseño y construcción de un sistema de bombeo y riego a escala, automatizado y alimentado con energía solar fotovoltaica*. Bogotá: Universidad Distrital.
- Campbell Scientific Inc. (2000). *Manual 253 y 253L*. Riverside, USA: Campbell Scientific Inc.
- Chard, J. (2005). *Wetmark soil moisture sensors. Characteristics and operating*. Logan, USA: Wetermark.
- De Juana, J. M. (2003). *Energías renovables para el Desarrollo*. Madrid: Thomson.
- Fmpln-wwf. (2009). *Manual de buenas prácticas de riego*. Madrid: Wwf.
- Ideam (2012). *Compra de información*. Bogotá: Ideam.
- Ideam. (2012). *Reporte datos metereológicos y de flujo hídrico*. Bogotá: Ideam.
- Odnuplay-fao. (2006). *Guías para la determinación de requerimientos de agua en cultivos agrícolas*. Roma: FAO.
- Onu. Fao. (1994). Manejo de nutrientes en sistemas de riego. *Seminario regional sobre los sistemas dendroenergéticos optimizados para el desarrollo rural y la protección ambiental*, Roma.
- Oregon State University (2005). *Malheur Experiment Station. Irrigation monitoring using soil water tension*. Oregon: Oregon Station University.
- Sandia National Laboratories. (2001). *Guía para el desarrollo de proyectos con bombeo de agua usando energía solar fotovoltáica*. México, D.F.: Texmico.
- Uco. (2009). *Guía de usuario de Arduino*. Córdoba, España: Universidad de Córdoba.
- Upme. (2005). *Mapas de brillo y radiación sloar en Colombia*. Bogotá: Upme.
- Watermark. (2001). Hoja de especificaciones técnicas. Riverside, USA: Irrometer. Co.