

# Diseño e Implementación de un Sistema de Riego Inteligente basado en Sensores y Módulos de Radiofrecuencia para Transmisión y Sistema de Control

José Andrés Muñoz Arcentales<sup>(1)</sup> Vanessa Calero Bravo<sup>(2)</sup> Ignacio Marín-García<sup>(3)</sup>  
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador  
jmunoz@fiec.espol.edu.ec<sup>(1)</sup>, vcalero@fiec.espol.edu.ec<sup>(2)</sup>, imaringa@fiec.espol.edu.ec<sup>(3)</sup>

## Resumen

*Un Sistema de Riego Inteligente (S.R.I) es un sistema que se enfoca en el ahorro de agua y energía, surtiendo a la planta del agua que necesita y no de la que el hombre cree necesaria. Para alcanzar este objetivo se deben de recolectar constantemente los parámetros que influyen en el regadío como son, la humedad relativa del suelo y la temperatura ambiental. Nuestro S.R.I ha sido diseñado pensando en las necesidades del agricultor ecuatoriano, que muchas veces no puede acceder a la tecnología para mejorar su proceso de producción agrícola puesto que la tecnología va de la mano, la mayoría de las veces de una gran inversión económica que hace inalcanzable la idea de implementar Sistemas de Riego Inteligente que existen en el mercado.*

**Palabras Claves:** Sistema de Riego Inteligente, Agricultura, Automatizar

## Abstract

*Smart Irrigation System (S.I.S) is a system that focuses on saving water and energy, providing water that the plant needs and not what the farmer thinks necessary. To achieve this target must constantly collect the parameters that influence such as irrigation, soil relative humidity and ambient temperature. Our S.I.S has been designed thinking in the needs of the Ecuadorian farmers, who often can not access to technology to improve agricultural production process due to that the technology goes hand in hand, most of the time of a financial investment that makes unattainable the idea of implementing Smart Irrigation Systems on the market.*

**Keywords:** Smart Irrigation System, Agriculture, Automate.

## 1. Introducción

El Ecuador es un país fundamentalmente agrícola que registró en 2010 una superficie dedicada a la agricultura de 7'303.674 hectáreas según encuestas del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [1], es por eso que diseñar sistemas que ayuden a maximizar la producción y minimizar los costos y recursos es necesario en un país como Ecuador, debido a ello es que en este proyecto se implementó un sistema de Riego Inteligente basado en Sensores inalámbricos y que envían los datos a través de módulos de radiofrecuencia. En este proyecto se diseñó e implementó una topología de red escalable, junto con una Aplicación Web que sirvió de interfaz para que el usuario pudiera monitorear el sistema de una forma fácil y amigable. El sistema de Aplicación Web, provee al usuario de los indicadores necesarios para la toma de decisiones con respecto al riego o el ajuste manual del sistema. Finalmente, el sistema es capaz de tomar la decisión de riego apropiada, haciendo uso de curvas de riego y de los parámetros ambientales medidos en el cultivo.

Para que el sistema fuera lo más autónomo posible, se integró al Paquete de Sensores (PS), un circuito de paneles solares para que proporcionará la energía eléctrica necesaria y se diseñó e implementó el hardware que compone el proyecto, así como el protocolo de envío y recepción de los datos por radiofrecuencia.

Para comprobar la viabilidad del sistema, se realizaron análisis de costos de implementación, pruebas en ambiente controlado y de campo (jardín de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación), que fueron las que nos dieron las pautas para justificar que nuestro sistema es aplicable a la agricultura del país.

## 2. Riego Inteligente

El 60% del agua que se usa en todo el mundo está destinada para el regadío [2]. Para el agricultor el uso de un sistema de riego provoca una mayor producción en la cosechas a un menor coste, es decir usar menos agua y mantener o inclusive aumentar la producción

es la meta al momento de implementar un sistema de riego.

El mecanismo en un Sistema de Riego Inteligente es sencillo, cuentan con sensores clásicos que comunican, de forma inalámbrica, con un portal web al que los agricultores pueden acceder a través de internet. Es un sistema simple, económico y que no molesta, ni al ambiente, ni al propio agricultor, que podrán utilizar el ordenador, una tableta o, incluso, un teléfono móvil para seguir las instrucciones sobre el riego recomendado [3].

### 3. Sensores Inalámbricos

Las Redes de Sensores Inalámbricos, (WSN por sus siglas en inglés Wireless Sensor Network), son redes de dispositivos que colaboran en una tarea en común. Por lo general las redes de sensores inalámbricos están formadas por un grupo de sensores que tienen comunicación inalámbrica y que permiten formar redes sin una infraestructura física preestablecida ni administración central [4].

#### 3.1. Arquitectura

Las redes de sensores están constituidas por pequeños dispositivos llamados sensores o nodos, que poseen cierta capacidad de procesamiento y comunicación ligada al tiempo de vida que es proporcionado por una batería, estos nodos se encuentran en un área determinada a monitorear. La estructura general de las WSN permite que la información sea recolectada por cada nodo, luego de esto se realiza una conversión a digital para posteriormente ser transmitidas hacia fuera de la red por medio de un nodo Puerta de Enlace y ser enviada hacia una estación base, donde la información pueda ser almacenada temporalmente, finalmente la información es trasladada hacia un servidor de mayor capacidad para poder realizar un análisis de los datos. Típicamente una WSN tiene una topología como la mostrada en la Figura 3.1.

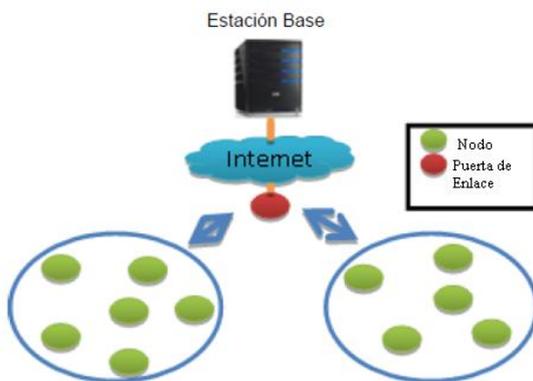


Figura 3.1 Estructura Redes de Sensores Inalámbricos

### 3.2. Protocolo AODV

En este proyecto se tomó como base el protocolo AODV (ad-hoc on demand distance vector). El protocolo AODV, es de tipo reactivo, es decir que sólo busca la ruta cuando es necesario, lo que desencadena en una alta latencia para el primer paquete, pero que es compensado con la independencia entre rutas y el bajo consumo de energía y procesamiento. Entre las características más destacables de este protocolo tenemos: que es bajo demanda, encaminado salto a salto y además que para distinguir la información moderna de la antigua, se emplean horas lógicas locales (Identificador de nodo, Número de secuencia). Para el control de tráfico se debe tener en cuenta de que toda información siempre acaba caducando, por lo general al cabo de pocos segundos[5].

#### 3.2.1. Funcionamiento.

Cuando se necesita conocer la ruta desde un origen (O) hacia un destino (D), entonces se inunda la red con peticiones RREQ (Route Request), viajando a lo largo de la red hasta llegar al destino buscado o a algún nodo que sepa cómo llegar a dicho destino, entonces en ese momento ese nodo envía un paquete de RREP (Route Response) [5]. El RREP conoce como llegar al origen porque la inundación de RREQ fue creando el camino de vuelta (Figura 3.2) y a medida que este paquete va viajando al origen va creando el camino de ida, y una vez que el paquete llega al origen entonces este ya puede empezar a enviar las tramas con los datos correspondientes[5].

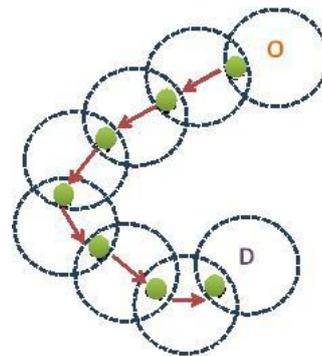


Figura 3.2 Formación de camino RREQ

El RREQ tiene que saber volver por eso cuando las peticiones de ruta inundan la red, las tablas apuntan hacia el origen, si un nodo no sabe responder una petición de ruta, la reenvía, y luego de esto las tablas almacenan, en cada entrada, la hora lógica en el origen [5]. La Figura 3.3 detalla la trayectoria de las respuestas para completar la fase de formación del camino de ida, en la que se indica mediante flechas el recorrido de los mensajes RREP.

El RREQ tiene éxito si llega al destino o a alguien que sabe llegar al destino, cuando el RREP vuelve, las tablas de los nodos apuntan hacia el destino. También se conserva la horológica del destino, si transcurrido cierto tiempo no llega un RREP, entonces se borra la información [5].

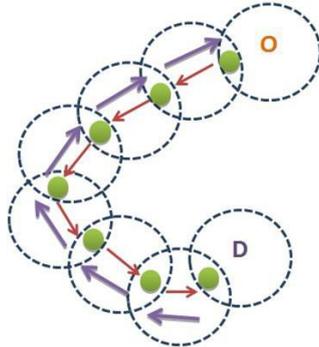


Figura 3.3 Formación de camino RREP

## 4. Diseño del Sistema

En el diseño inicial del paquete de sensores se tomaron en consideración algunos aspectos entre ellos la escalabilidad es por esto que se diseñó un sistema modular que acepte adaptaciones con tecnologías emergentes permitiendo al sistema el desarrollo de soluciones e implementaciones en diferentes campos de acción. El sistema está compuesto de dos tipos de paquetes: el Paquete de Sensores (PS) y el Paquete de Control Central (PCC), como se indica en la Figura 4.1, los cuales constan de tres subsistemas cada uno. El PS está compuesto por el Sub-sistema de Sensores (SSS), Sub-sistema de Lógica y Control (SSLC) y el Sub-sistema de Comunicación (SSC); por otra parte, el PCC por el Sub-sistema de Base de Datos (SSBD), Sub-sistema de Lógica y Control (SSLC) y El Subsistema de Comunicación (SSC).



Figura 4.1 Diagrama de Bloques del Sistema

Para poder tener una completa funcionalidad del sistema, se diseñó e implementó una aplicación web

que fue almacenada en un servidor externo, permitiéndole así al usuario poder acceder, monitorear y administrar el sistema desde cualquier lugar y en cualquier momento siempre y cuando tuviera conexión a internet, y también en un servidor local, en el caso de no tenerla. En base al análisis del medio, el sistema maneja un esquema de red centralizado en donde los nodos tienen como objetivo final hacer llegar la información recolectada al concentrador, y este a su vez toma dicha información proveniente de los nodos y la envía al servidor donde se aloja la aplicación web, gráficamente el sistema está gobernado por el siguiente flujo de trabajo como se muestra en la Figura 4.2.

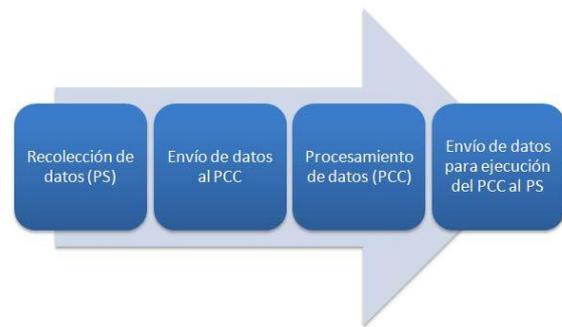


Figura 4.2 Flujo de Trabajo del Sistema

### 4.1. Subsistema de Sensores

El SSS es el encargado de recolectar las mediciones de los parámetros ambientales y de cultivo necesarios para el funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta que uno de los objetivos principales del sistema es la optimización de los recursos. Para llevar a cabo dicho objetivo se eligieron dos parámetros de medición, los cuales fueron la temperatura ambiental y la humedad del suelo. Para la obtención de los datos anteriormente mencionados se planteó la utilización de sensores, para medir la temperatura se eligió un sensor que permitió obtener mediciones en grados Celsius con un decimal de precisión y para el sensor de humedad un dispositivo que fuera económico, regulable y que nos ofreciera mediciones porcentuales de la cantidad de agua presente en el suelo. Este subsistema toma los datos obtenidos a través de sus periféricos (sensor de temperatura y humedad) y los transfiere hacia el SSLC del PS para que en este subsistema se realicen las funciones de almacenamiento, empaquetamiento y posterior envío hacia el SSC.

### 4.2. Subsistema de Lógica y Control

El SSLC fue diseñado para satisfacer las necesidades de empaquetamiento de los datos y de almacenamiento de las rutas necesarias para el correcto funcionamiento del protocolo de comunicación que será descrito en la sección 5. El

SSLC está conformado por un microcontrolador que es la unidad de procesamiento del protocolo de comunicación y cuya función consiste en que una vez obtenidos los datos a través del SSS se añadan las cabeceras para formar las tramas a ser enviadas a través del SSC.

Para el funcionamiento del protocolo de enrutamiento es necesario el almacenamiento temporal de las rutas hacia los diferentes nodos de la red. Para ello se utilizó también como parte de este subsistema una memoria de almacenamiento no volátil, para que las rutas se encuentren permanentemente disponibles y puedan ser actualizadas en base a los cambios que se generen en la red, manteniendo así una estrecha relación con los otros dos subsistemas que conforman el PS.

### 4.3. Subsistema de Comunicación

Al El SSC lo conforma un módulo de radiofrecuencia, que en conjunto con el SSLC descrito en el apartado anterior, permiten establecer la comunicación entre los PS y el PCC. Esto se logró gracias a que la lógica del protocolo de enrutamiento se encuentra en el SSLC y este envía los datos listos con las cabeceras correspondientes hacia el SSC. Una vez que las tramas llegan al SSC, este actúa como puente de comunicación entre el PS y el PCC usando como medio de transmisión bandas de radiofrecuencias no licenciadas (915 MHz). El módulo de radiofrecuencia es el componente principal del SSC y tiene la capacidad de actuar como transmisor o como receptor en base a las necesidades del PS, el método de transmisión que utiliza es de tipo half dúplex con un rango de alcance máximo de 100 metros teóricos.

Al igual que el Paquete de Sensores (PS), el Paquete de Control Central (PCC) también se divide en Sub-sistema de Lógica y Control (SSLC), Sub-sistema de Comunicación (SSC) y Sub-sistema de Bases de Datos (SSBD). El SSLC se encarga de la interpretación de los datos obtenidos tanto del SSBD como del SSC además de la elección de la mejor ruta (BestPath) para el correcto envío de los paquetes. El SSC del PCC es el encargado de la transmisión y recepción de la información proveniente de cada nodo. El SSBD tiene como objetivo el almacenamiento y procesamiento de todos los datos recibidos desde el PS.

### 4.4. Subsistema de Base de datos

El subsistema de base de datos está compuesto por dos elementos, el primero es la base de datos en donde se almacena la información proveniente de los nodos y el segundo es una interfaz web de administración, procesamiento y análisis de los datos. Por medio de la

relación que existe entre estos dos elementos, se le dio al usuario el acceso y administración de los datos, así como el control de cada uno de los nodos presentes en el sistema. La interfaz de administración le permite al usuario realizar las funciones descritas en la Tabla I.

Tabla I Funciones Aplicación Web

Funciones	Usuario Final	Administrador
Ingresar nuevos nodos	✗	✓
Encender o apagar bombas	✓	✓
Ingresar horarios de riego	✓	✓
Modificar horarios de riego	✓	✓
Abrir o cerrar válvulas	✓	✓
Calibrar sensores	✗	✓
Configurar hora del sistema	✓	✓
Crear nuevo usuario	✓	✓
Configurar dirección IP	✗	✓
Configurar puertos de comunicación	✗	✓
Consultar horarios Programados	✓	✓
Consultar valores de Temperatura	✓	✓
Consultar valores de humedad	✓	✓
Consultar carga de batería	✓	✓
Generar reportes de humedad	✓	✓
Generar reportes de temperatura	✓	✓

## 5. Implementación del Sistema

Al momento de implementar cualquier sistema se debe respetar el diseño previamente establecido y cumplir con los objetivos. Físicamente el sistema está compuesto por múltiples nodos (PS) y un concentrador (PCC), cada uno de los elementos está compuesto por varios periféricos que permiten la conectividad y el correcto funcionamiento del sistema. La implementación descrita se puede comprender detallando la arquitectura de todo el sistema.

La arquitectura del sistema se basó en la utilización de múltiples nodos y un concentrador, (teniendo en cuenta que la cantidad de nodos se define de acuerdo a la aplicación o pruebas a realizarse) y utilizando las ventajas que las redes de sensores inalámbricos proveen; permitiendo así, mantener un esquema de recolección de datos de forma centralizada, en donde los nodos se definen como el conjunto de elementos que permiten obtener los datos del sembrío, cada nodo está formado por un sensor de temperatura ambiental y humedad relativa del suelo, este conjunto de sensores permite que el nodo interactúe en forma directa con las condiciones climáticas del cultivo. También cuenta con un panel solar conectado a una pequeña batería lo que le permite al nodo contar con la suficiente independencia energética para poder realizar las labores de procesamiento y recolección de datos, así mismo posee un módulo de radiofrecuencia por el cual los nodos envían y reciben los datos recolectados por los sensores hacia y desde el controlador central; como parte final del nodo tenemos el actuador que en nuestro caso es una electroválvula que permitirá la irrigación del cultivo. En la Figura 5.1 podemos observar el esquema de cada nodo de nuestro sistema.



Figura 5.1 Componentes del Nodo

Por otra parte, el concentrador es el que permite enviar y recibir los datos, desde y hacia cada uno de los nodos, para realizar la tarea de almacenamiento de los mismos de forma inalámbrica, labor que se realiza por medio de un módulo de radiofrecuencia. El concentrador tiene también como función, servir de puente de comunicación entre la interfaz de administración que maneja el usuario y cada uno de los nodos que conforman el sistema, utilizando un módulo de comunicación vía Ethernet; además, da la ventaja de mantener la comunicación con el sistema desde cualquier lugar en donde se cuente con una conexión a internet. En la Figura 5.2 podemos apreciar el esquema del Concentrador.



Figura 5.2 Componentes del Concentrador

Tomando como premisa lo anteriormente mencionado, el sistema se comportó de la siguiente manera, los nodos adquirieron los parámetros ambientales de temperatura y humedad del suelo, estos datos fueron procesados por medio de una unidad de control existente en cada nodo y de acuerdo a los valores que se obtuvieron, el nodo tuvo la facultad de decidir si enviar o no la señal de apertura o cierre de la electroválvula. Los datos recolectados por los nodos se enviaron hacia el concentrador, este envió vía Ethernet dichos datos hacia un servidor de base de datos local y remoto, para que el usuario pueda hacer uso de ellos cuando lo crea conveniente.

El usuario cuenta con dos tipos de interfaces una local y otra remota utilizando una aplicación web, ambas cuentan con las mismas opciones de administración. La importancia de mantener las dos interfaces se fundamenta en contar con un alto nivel de disponibilidad, es decir que de una u otra forma el usuario pueda acceder a la administración del sistema. Cabe recalcar que el usuario puede decidir la apertura o cierre de las válvulas de cada nodo, programar horarios de riego, ver estadísticas de irrigación del cultivo y estadísticas de los valores ambientales recolectados por los nodos. Una revisión gráfica de lo descrito en esta sección la podemos encontrar en la Figura 5.3 donde se muestra el diagrama funcional del sistema.

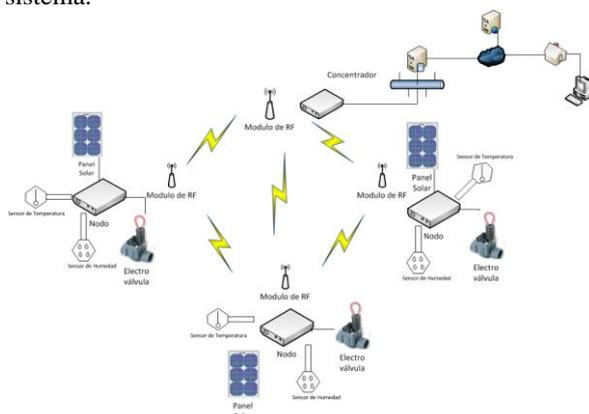


Figura 5.3 Arquitectura del Sistema

## 6. Pruebas

Estas pruebas se centraron en el análisis del funcionamiento del sistema en un ambiente de ejecución real y luego en el establecimiento de una comparación de eficiencia del uso del agua en el cultivo y su efecto en la obtención del fruto allí sembrado. Para esto se utiliza como objeto de estudio el Cucumis Sativus (pepino), debido a que este tiene un ciclo de producción inferior a los sesenta días, pudiendo dentro de este tiempo obtener y almacenar los datos ambientales para su posterior análisis.

El lugar de ejecución de las pruebas fue el CENAE (Centro Experimental y de Enseñanza Agropecuario de la ESPOL) utilizando de este un área cultivable de doscientos metros cuadrados y cuyo sistema de irrigación fue el riego por goteo. El área total cultivable mencionada anteriormente se dividió en dos secciones que denominaremos sección A y sección B. La sección A fue acondicionada con la instalación de un nodo para el control de riego y la sección B para realizar el riego de forma tradicional (Figura 6.1), teniendo así cada sección con cinco surcos, una longitud de diez metros y separación de uno punto cinco metros entre ellos.



Figura 6.1 Área de Cultivo

El nodo de recolección de los datos fue ubicado en la primera línea de la sección A, a una distancia de ochenta y un metros del concentrador permitiendo que siempre exista comunicación entre estos dispositivos. El umbral de operación definido en estas pruebas fue entre el treinta y el sesenta por ciento de humedad presente en el suelo, es decir cuando el valor de humedad presente en la tierra fuera menor al treinta por ciento entonces el servidor enviaba la orden de apertura de la electroválvula asociada al nodo uno y cuando la humedad del campo fuera mayor al sesenta por ciento el servidor enviaba la señal de cierre de la electroválvula.

Con los valores del agua total consumida en cada una de las secciones del cultivo, se puede concluir que el sector A tuvo un ahorro de agua del 12,53 % con respecto al sector B. Por otra parte, se tomaron los datos de peso, diámetro y longitud del fruto obtenido después de la cosecha (Figura 6.2). Con estos datos y la cantidad de agua utilizada en ambas secciones del cultivo se realizó una comparación entre las medias obtenidas así como las pruebas estadísticas para analizar el rendimiento de cada sección del cultivo. Obteniendo que para cada uno de los parámetros que se midieron en los frutos, la producción del sector A es estadísticamente igual a la del sector B.

Imagen	Codigo	Peso(g)	Diámetro	Longitud(cm)
	02-001	434,5	5,6	23,4
	01-001	390,4	5,4	21,1
	01-002	422,4	5,4	22,2
	01-003	423,4	4	21,1
	01-004	382,5	5,4	22,2
	01-005	402	5,4	22,2
	01-006	377,4	5,4	22,2
	01-007	434,5	5,4	23,4
	01-008	292,5	5,4	21,1
	01-009	302,4	6,4	17,4
	01-010	292,2	5,2	16,2
	01-011	412	6,4	21,1
	01-012	483,4	5,4	24,4
	01-013	378,3	5,4	23,4
	02-002	407,4	6,4	25,2
	02-003	394,4	5,4	23,2
	02-004	403,2	5,2	23,2
	02-005	426,4	5,2	24,4
	02-006	436,4	5,4	23,2
	02-007	426,4	5,4	23,2
	02-008	425,4	6,2	23,2
	02-009	383,4	6,4	23,2
	02-010	386,2	5,4	23,2
	02-011	404	5,4	23,2
	02-012	423,4	5,4	23,4

Figura 6.2 Frutos obtenidos en el Cultivo

## 7. Conclusiones

Con la realización de las pruebas de campo se logró demostrar que al hacer uso de un sistema de riego inteligente se obtiene un significativo ahorro de los recursos hídricos frente al sistema de riego tradicional, manteniendo el mismo nivel de producción como se demuestra en la sección seis a través del análisis estadístico de los frutos obtenidos.

El costo de implementar un sistema de riego inteligente diseñado y ensamblado de forma individual y propia es muchísimo menor que los sistemas de riego que existen actualmente en el mercado.

A pesar de que en teoría el alcance entre las antenas es de 100 metros, siempre es necesario realizar pruebas de alcance para poder determinar la distancia máxima en las que los módulos RF pueden operar sin fallos de comunicación.

## 8. Recomendaciones

Se debería de hacer un análisis comparativo entre el protocolo de comunicaciones AODV original y que se utilizó en este proyecto, para lograr determinar si se obtiene un significativo ahorro de energía en cada nodo.

La ubicación de los sensores en el campo debe de ser libre de árboles o algún tipo de sombra que impida que los paneles solares aprovechen toda la energía de la radiación solar.

El concentrador debe de permanecer en un lugar libre de humedad y ventilado para prevenir posibles fallos además de poseer corriente eléctrica todo el tiempo para que no existan pérdidas de datos.

Se debe de optimizar los algoritmos programados en cada nodo para consumir menor cantidad de energía lo que supondrá la disminución de los costos de implementación.

Se debe hacer uso de conexiones inalámbricas puesto que las cableadas en lugares con grandes extensiones no son viables ya que suponen costos de mantenimiento elevados.

## 9. Bibliografía

[1]El Telégrafo, (2011), Ecuador tiene 7,3 millones hectáreas de labor agrícola, Recuperado el 7 de Marzo de 2013, de <http://www.telegrafo.com.ec/actualidad/item/ecuador-tiene-73-millones-hectareas-de-labor-agricola.html>.

[2]UNESCO, (2008), El Agua en un mundo en constante cambio, Recuperado el 12 de Enero de 2013, de [http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/wwap\\_WWDR3\\_Facts\\_and\\_Figures\\_SP.pdf](http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/wwap_WWDR3_Facts_and_Figures_SP.pdf).

[3]Medioambientales, (2012), El riego inteligente ahorra un 40% de agua, Recuperado el 20 de Mayo de 2012, de <http://medioambientales.com/el-riego-inteligente-ahorra-un-40-de-agua/>.

[4]EDMANS,(2009), Redes Inalámbricas de Sensores: teoría y práctica, Universidad de la Rioja, pp. 17-20.

[5]C. Perkins y E. Belding-Royer,(2002), Ad hoc On-demand Distance-Vector (AODV) routing, IETF.