

**EVALUACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN CULTIVOS ESTRATÉGICOS DE
BOYACÁ PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS DE ROBÓTICA, EN EL DISEÑO
DE RIEGOS EFICIENTES**

WILSON ENRIQUE MARTÍNEZ PARRA

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL

TUNJA -BOYACA

2022

**EVALUACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN CULTIVOS ESTRATÉGICOS DE
BOYACÁ PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS DE ROBÓTICA, EN EL DISEÑO
DE RIEGOS EFICIENTES**

MARTINEZ PARRA WILSON ENRIQUE

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

TUTOR

EDGAR ANDRES GUTIERREZ CACERES

INGENIERO ELECTRONICO

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL

TUNJA, BOYACA

2022

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecerle a Dios por brindarme la familia que tengo y por permitirnos cumplir este sueño.

A mi señora madre Ruth Ingrid Parra Suarez, quien ha sido madre y padre para mis hermanos y para mí, quien ha sido mi motor de lucha, mi apoyo incondicional y que gracias a ella puedo cumplir este sueño, que es tanto mío como de ella.

A cada uno de mis hermanos, Nelson, Wilder y Angie que siempre han sido un factor de motivación muy importante, que con sus ganas de trabajar y salir adelante, me han dado la fuerza de continuar en los momentos de flaqueza y debilidad, gracias por todo hermanos.

A mis tíos Jeimy Johana Herrera Suarez y Jhon Fredy Ávila Niño porque siempre han confiado en mí y me han brindado su apoyo en cada momento de mi carrera, que nunca me dejaron desistir por más grandes que fueran las dificultades siempre estuvieron ahí apoyándome, con su granito de arena.

A mi novia Laura Lizeth Gómez Barrera porque ha sido la persona que me ha acompañado desde el colegio, que me motivó a pensar en una carrera profesional, que me apoyó incondicionalmente en mi proceso de estudio, gracias por siempre estar ahí, con tus palabras de apoyo y cariño todos los días, por brindarme tu amor y tu compañía, por enseñarme a luchar por los sueños y sobre todo gracias por estar conmigo en toda la carrera viviendo cada triunfo y cada avance como si fuera tuyo, gracias infinitas mi negra.

A mis amigos de estudio, Paula, Julián, Andrés, Harold, Karolay; Sergio, Leyder, gracias por todo lo vivido en estos 5 años de estudio.

A mis amigos de toda la vida. Rodrigo, Georman, Camilo, Yessica, Leyder por siempre apoyarme en todo.

A cada uno de los ingenieros que aportaron en mi formación como ingeniero ambiental, gracias ingenieros: Hernando, Brigid, Eduar, Luz Ángela, Camilo, Ivan, Camilo, Alejandra, Sandra, Claudia, gracias por tantas enseñanzas.

A la Universidad Santo Tomas Seccional Tunja por recibirme y formarme como un gran ser humano y un buen profesional, gracias SANTOTO.

Gracias infinitas a todas las personas mencionadas anteriormente y también a las personas que seguramente me falto mencionar pero que en algún momento de mi vida han aportado algo para mi formación como ser humano y como profesional.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	8
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	14
2 JUSTIFICACIÓN	15
3 OBJETIVOS	16
3.1 OBJETIVO GENERAL	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
4.1.1 SISTEMAS DOMOTICOS.....	16
4.1.2 SENSORES.....	17
4.1.2.1 SENSOR ANALÓGICO.....	18
4.1.2.2 SENSOR DIGITAL	18
4.1.3 TRANSDUCTORES	19
4.2 SISTEMA DE RIEGO	20
4.2.1 SENSORES DE HUMEDAD.....	20
4.2.1.1 SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD INTEGRADO.....	21
4.2.1.2 SENSORES CAPACITIVOS	21
4.2.1.3 SENSORES MECÁNICOS	21
4.2.2 RIEGO POR GOTEIO	22
5 MARCO REFERENCIAL	26
5.1 MARCO CONCEPTUAL.....	26
5.1.1 HUMEDAD DEL SUELO.....	26
5.1.2 GEOESTADISTICA.....	26

5.1.3	INTERPOLACIÓN DE DATOS	26
5.1.4	XBEE ZIGBEE	27
5.3	MARCO TEÓRICO.....	29
5.3.1	ANÁLISIS DE KRIGING	29
5.3.2	ANÁLISIS VARIOGRAFICO	31
5.4	MARCO LEGAL	35
5.4.1	NORMATIVA PARA REDES WSN	35
	CULTIVO DE TOMATE.....	36
5.4.2	CONDICIONES AGROECOLÓGICAS IDEALES PARA EL CULTIVO DE TOMATE	37
5.4.2	ETAPAS DEL CULTIVO DE TOMATE	38
5.4.3	PREPARACIÓN DEL SUELO	38
6	METODOLOGÍA	40
	POBLACIÓN.....	41
	MUESTRA	42
6.1.1	CALIBRACIÓN DE SENSORES	46
6.1.2	TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES	46
6.1.3	DESARROLLO DE ALGORITMOS PARA ANÁLISIS	47
6.1.4	DISEÑO DE RED WSN.....	47
7	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	47
8	CONCLUSIONES	62
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1: Modo de operación API	28
Imagen 2: Modo de operación AT	29
Imagen 3: Zona invernadero 1	42
Imagen 4: Zona invernadero 2	43
Imagen 5: Zona invernadero 3	43
Imagen 6: Toma de datos en campo antes del riego	44
Imagen 7: Toma de datos en campo después del riego	44
Imagen 8: Toma de datos en campo	45
Imagen 9: Muestra en cultivo en etapa de producción	45
Imagen 10: Equipo de muestro en campo	46
Imagen 11: Tramo 1 sector 1 antes de la aplicación del riego (T1S1N)	48
Imagen 12: Tramo 1 sector 1 después de la aplicación del riego (T1S1R)	49
Imagen 13: Tramo 1 sector 5 antes de la aplicación del riego (T1S5N)	50
Imagen 14: Tramo 1 sector 5 después de la aplicación del riego (T1S5R)	51
Imagen 15: Tramo 2 sector 1 antes de la aplicación del riego (T2S1N)	52
Imagen 16: Tramo 2 sector 1 después de la aplicación del riego (T2S1R)	53
Imagen 17: Tramo 2 sector 5 antes de la aplicación del riego (T2S5N)	55

Imagen 18: Tramo 2 sector 5 después de la aplicación del riego (T2S5R)	55
Imagen 19: Tramo 3 sector 1 antes de la aplicación del riego (T3S1N)	57
Imagen 20: Tramo 3 sector 1 después de la aplicación del riego (T3S1R)	57
Imagen 21: Tramo 3 sector 5 antes de la aplicación del riego (T3S5N)	58
Imagen 22: Tramo 3 sector 5 después de la aplicación del riego (T3S5R)	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: características de la xbee zigbee	27
Tabla 2: Recomendación IEE 802.15.4	36
Tabla 3: Recomendación IEEE 802.11	36
Tabla 4: Invernadero 1	41
Tabla 5: Invernadero 2	41
Tabla 6: Invernadero 3	41
Tabla 7: ETP invernadero 1	60
Tabla 8: ETP Invernadero 2	61
Tabla 9: ETP Invernadero 3	62

RESUMEN

La agricultura como factor de gran importancia para el desarrollo de una población, satisface una de las más importantes necesidades del ser humano como la alimentación. Usualmente los alimentos se obtienen de los cultivos que producen los agricultores, donde el agua tiene una gran importancia, ya que todos los cultivos la necesitan para su desarrollo. Pero como se ha venido observando en los últimos años, este recurso está en un punto crítico, ya que por

ejemplo, en Colombia ya se encuentran zonas en las que se tiene que cultivar en tiempos determinados, debido a la falta del agua

Con la implementación de herramientas electrónicas se logró identificar la humedad del suelo en los cultivos de tomate bajo invernadero en la vereda Hato del municipio Miraflores, Boyacá, mediante el método de kriging se interpolaron estos datos tomados en campo, para realizar una representación gráfica que permite evidenciar el mapa total de humedad del suelo del cultivo seleccionado, gracias a estos estudios y desarrollo del proyecto con la implementación de las herramientas electrónicas se puede llegar a recomendarle a los agricultores de la zona el tipo de riego más adecuado para sus cultivos y pueden obtener unos mejores resultados en su ciclo de vida.

De esta manera se logra un uso adecuado del recurso hídrico sin afectar los cultivos de los agricultores, debido a que en el desarrollo de este proyecto se realizaron pruebas en 3 invernaderos diferentes, con horarios distintos y con tipos de riego diferentes, por esta razón se logró obtener resultados confiables.

PALABRAS CLAVE: Método Kriging, Recurso Hídrico, Interpolación, Riego, Humedad del suelo.

1. INTRODUCCION

De acuerdo a la historia de la agricultura, se dice que los grupos iniciales de personas que llegaron a Mesoamérica alrededor de los años 11600 antes del presente (AP), arribaron por la costa del Pacífico y poseían tecnología avanzada para realizar la caza de mamíferos marinos pertenecientes a dicho sector por donde provenían. Se cree que probablemente pudieron ingresar

a tierra firme por los denominados ríos Santiago-Lerma y Balsas-Mezcala, teniendo como resultado el establecimiento de los sistemas lacustres de Chapala-Zacoalco-Sayula, perteneciente al valle de Puebla y México. Por otra parte, hacia 10600 AP comienzan a surgir conjuntos de seres humanos que pretendían tener nuevas adaptaciones tecnológicas para poder cazar venados y también poder recolectar plantas procedentes del suroeste y las grandes planicies de Estados Unidos. Se establece que para los años 10000 AP tras investigaciones ecogeográficas y paleoecologías surgieron los cultivos y la respectiva domesticación de animales. Finalmente es importante mencionar que gracias a los datos ecológicos, biológicos, evolutivos y genéticos dictaminan que el occidente de México es el centro inicial de domesticación de especies característico de la agricultura mesoamericana. (Villarreal & García Marín, 2008).

Se puede establecer que desde los años setenta, la generación mundial para los alimentos ha ido de la mano con el crecimiento demográfico, suministrando alimentos a la población del planeta con más comida por cápita a precios cada vez más bajos en ámbitos generales, pero con un gran influyente que es el recurso hídrico en el siglo XX. Se destaca que la agricultura para estos tiempos llegaba a emplear por término medio el 70 % de toda el agua que se utilizaba en el mundo, concluyendo según la FAO el agua destinada para el riego aumentaría en un 14%, para el año 2030, aunque este aumento, se manifiesta que es inferior al de los años noventa, según las proyecciones que se plantean, la escasez aumentara cada vez más en algunos lugares y en ciertos casos en regiones, lo que dificultará y limitará la producción local de los alimentos.(FAO, 2002)

Es importante mencionar que la agricultura colombiana presenta un deficiente desempeño respecto a todas las necesidades de desarrollo para el territorio, debido a las problemáticas de los habitantes de los sectores rurales al igual que la cantidad de recursos naturales con los que se cuenta y las posibles oportunidades de crecimiento con las que cuenta el mercado internacional e

interno. La baja participación en la agricultura ha tenido un impacto frente a la pérdida progresiva sobre la participación de dicho sector en el PIB general. (Perfetti del Corral et al., 2013)

El departamento de Boyacá se ha caracterizado por ser uno de los sectores con más influencia a nivel nacional e internacional en referencia a temáticas agropecuarias. Boyacá se destaca por poseer diferentes regiones con pisos térmicos variados que contribuyen a que exista una gran variedad de cultivos que favorecen a todo el país, esta capacidad de poseer una amplia gama de productos agrícolas se favorece gracias a que dicho departamento se encuentra en la región centro de Colombia, lo que facilita su interacción económica frente a otros sitios de la nación. Por otra parte, se puede establecer que este departamento posee una gran variedad agroecológica y climática lo que permite la obtención de una gran variedad de productos agropecuarios. (*Pdd2016-02-D-Productivo.pdf*, s. f.)

La relación del recurso hídrico y la agricultura son un factor primordial en el planeta, la implementación del agua y la gestión se han convertido en un factor fundamental para que la productividad de la agricultura se eleve y tenga un mayor auge de tal manera que se asegure una producción previsible. Es por esto que el agua es esencial para poder aprovechar los potenciales que nos brinda la tierra, además de permitir que existan mejoras tanto en los animales como en las plantas, utilizando plenamente los factores de producción que elevan las condiciones de rendimiento. Se puede establecer que al incrementar los estados de productividad, la gestión sostenible del agua y especialmente si esta va acompañada de un sistema adecuado para el suelo, se contribuye al aseguramiento de una mejor producción de manera directa y también de forma comercial, favoreciendo la productividad de los excedentes económicos fundamentales para poder elevar las condiciones y economías rurales (Winpenny et al., 2013).

MOTIVACION

Este proyecto nace con la necesidad de brindar soluciones a la problemática de la humedad del suelo que se presenta en los cultivos de los agricultores del municipio Miraflores Boyacá, el proyecto nace en la asignatura de Ecología Industrial y Bioprocesos, con la colaboración de la facultad de ingeniería electrónica, en la implementación de sensores electrónicos para el estudio de la problemática.

De esta manera se busca solucionar esta problemática y poder brindarles una mejor información a todos los agricultores del municipio de Miraflores, Boyacá. Esta motivación también nace debido a las necesidades de las familias campesinas y agricultoras del municipio que toda la vida se han dedicado a la labor del campo, pero en los últimos años se han visto afectados por la escasez del recurso hídrico en los tiempos de verano, causándoles pérdidas en sus cultivos.

METAS Y ALCANCES

En la realización de este proyecto se busca cumplir con el objetivo del proyecto el cual se denomina, determinar la cantidad de agua en el suelo para dar una base en la determinación del estrés hídrico por deficiencia de agua para que de esta manera se les pueda brindar una información a los agricultores del municipio de Miraflores, Boyacá. Este proyecto se llevó a cabo en diferentes cultivos de tomate bajo invernadero, también se pretende alcanzar unos resultados verídicos para que este proyecto sirva como referencia en trabajos futuros sobre el cálculo del estrés hídrico de los cultivos, por medio de herramientas electrónicas y teorías ya existentes, de esta manera se deja evidencia de todo lo desarrollado en este proyecto.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La escasez del recurso hídrico es una de las más grandes problemáticas a nivel mundial, debido a las acciones antrópicas como la rápida urbanización y la agricultura descontrolada que existe en la actualidad por otra parte se puede evidenciar que en el paso de los años la carencia del recurso hídrico se viene aumentada, lo cual genera una gran problemática ya que este recurso es de vital importancia para los seres vivos y para el desarrollo de una civilización (Mejía, 2018).

El agua es uno de los recursos naturales más grandes que tiene el planeta, el único problema es que del 100% de agua que se encuentra en el planeta el 97% es agua salada, el 3% restante es agua dulce, pero el 2% está distribuido en agua los polos y los glaciares, por lo que solo queda un 1% de agua, con la cual los seres vivos satisfacen todas sus necesidades como supervivencia, agricultura, industria y servicios (Mejía, 2018).

Según la FAO más de 550 millones de personas viven en países con escasez y estrés hídrico, debido a la mala distribución del recurso hídrico, ya que en zonas como América del sur se dispone de un 26% de este recurso, donde el 6 % es para la población, la cuenca amazónica concentra el 15% de todas las existencias mundiales. Asia concentre el 60%, la población dispone del 36% de agua dulce disponible.

La seguridad hídrica y alimentaria es directamente proporcional, es por eso que, según la FAO, para la agroindustria se necesita más inversión y mejores políticas, debido a que la agricultura seguirá siendo la mayor consumidora de agua en el mundo.

En este sentido el consumo de agua por parte de la agricultura se vuelve un factor económico, debido a la prioridad fundamental, dada su fuerte repercusión en la gran cantidad de agua que utiliza la agricultura, sin embargo, la producción agrícola necesita establecer el

rendimiento mínimo, para poder ser una actividad viable y el riego se vuelve cada vez más importante para poder obtener dicha producción en los cultivos (Medrano et al, 2008).

La gestión del recurso hídrico de un país se conoce de acuerdo con las cuencas hidrológicas con las que cuente, del potencial de estas y el uso adecuado del recurso. El desarrollo tecnológico actual y de los últimos años, ha llevado a que la humanidad inicie a pensar en nuevas maneras de poder controlar y medir el uso del recurso hídrico en la agricultura, es por ello que se ve la necesidad de hacer uso de dicha tecnología e implementarla en cultivos seleccionados en el departamento de Boyacá, debido a que este departamento es uno de los más importantes a nivel de agricultura en el país, para este proyecto se seleccionaron cultivos de tomate bajo invernadero en la región de Lengupa, en el municipio de Miraflores, donde se mide la utilización del recurso hídrico en los sistemas de riego de los cultivos y la humedad del suelo por medio de la implementación de sensores electrónicos (Enciso et al., 2007).

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En este proyecto se evidencia la problemática general que es el estrés hídrico en los cultivos, debido a que a nivel mundial se lleva a cabo un mal uso del recurso hídrico, sobre todo en la agricultura es por ello que en este proyecto se planteó un estudio de humedad del suelo, con ayuda de herramientas electrónicas que pueden servir de apoyo a trabajos futuros sobre el estrés hídrico de las plantas, por consiguiente se seleccionaron 3 cultivos de tomate bajo invernadero en sus diferentes etapas de su ciclo de vida. En la vereda Hato del municipio de Miraflores Boyacá, en los cuales se aplicó una metodología que permitiera realizar una toma de datos viable y confiable para el análisis de los mismos. Lo que se busca es poder resolver la problemática que se observa en el municipio de Miraflores Boyacá, ya que en algunas veredas del municipio no se cuenta con distrito de riego y los agricultores se ven obligados a realizar captación de agua de aljibes o

quebradas cercanas a sus cultivos, se espera que con la implementación de esta metodología y la ayuda de las herramientas electrónicas se pueda obtener un resultado favorable para el proyecto.

2 JUSTIFICACIÓN

El mal uso y la falta del recurso hídrico, para los agricultores es una problemática que se ha venido presentando en los últimos años, es por eso que se han venido desarrollando nuevas tecnologías que puedan ayudar o solucionar esta problemática, debido a esto, este proyecto se desarrolla con el fin de aportar ideas positivas de base tecnológica para los agricultores, por esta razón se seleccionó el cultivo de tomate bajo invernadero en el municipio de Miraflores, Boyacá con la finalidad de implementar nuevas tecnologías electrónicas que puedan ayudarnos a medir la humedad del suelo que tienen los cultivos antes y después de aplicar el riego.

La implementación de herramientas electrónicas en los cultivos seleccionados tendrá la finalidad de responder al objetivo del proyecto, para de esta manera poder dar un aporte a los agricultores sobre el uso adecuado de los sistemas de riego según las necesidades del cultivo. Con lo cual se podrá determinar el mejor resultado para los agricultores y poder contribuir en su proceso.

Un aporte interesante de la tesis, es la cooperación de las facultades de ingeniería ambiental e ingeniería electrónica en temas de agricultura de precisión para cultivos del departamento de Boyacá.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar la humedad del suelo en cultivos estratégicos de Boyacá, mediante sistemas robóticos y el diseño de riegos eficientes.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar el potencial de uso de sistemas robóticos en el diseño de riegos eficientes.
- Evaluar el diseño de riegos eficientes en cultivos estratégicos del municipio de Miraflores, Boyacá.
- Evaluar la humedad del suelo en cultivos de tomate bajo invernadero en la vereda Hato del municipio de Miraflores Boyacá.

4 ESTADO DEL ARTE

INFORMACIÓN GENERAL

Las posibles aplicaciones que se le pueden dar a la electrónica actualmente son muchas y resaltan aspectos de la vida cotidiana, por ello es importante mencionar que sin los sensores dichas actividades no serían posibles. Se destaca que sin la capacidad que estos pueden ofrecer en cuanto a la medición de las magnitudes físicas para su control o conocimiento, varios de los dispositivos electrónicos no serían los suficientemente útiles y serían simples artefactos. (Pallas, 2008)

4.1.1 SISTEMAS DOMOTICOS

Los avances que ha tenido el mundo en cuanto a la tecnología han traído un gran progreso en los últimos años. Dichos adelantos se convirtieron en facetas fundamentales en los campos de la industria, al igual que en los ámbitos agronomía y de nuestros hogares, a esto se le denomina como el sector de la domótica. El termino anterior tiene su procedencia en la unión de las palabras

domus que significa casa en latín y robótica que proviene de robota, que significa esclavo. Se entiende por domótica a los conjuntos de sistemas que son capaces de automatizar una vivienda, o los sectores aledaños a la misma, lo que favorece a la integración por medio de interiores y exteriores en referencia a la comunicación, con directrices pre establecidas como lo pueden ser de cableado o inalámbrico, cada uno independiente con su respectivo control de la situación. (Cuzco & Tenemaza, 2013)

4.1.2 SENSORES

La utilización de los sensores es un factor fundamental en cuanto a la automatización de la industria en procesos de manufactura, donde se incluye la ingeniería experimental, la robótica, en sectores tanto productivos como los agrícolas, como en los que tengan relación al ahorro energético y el control ambiental, en los cuales se destacan el manejo del ruido, aire y la calidad del agua. (Pallas, 2008)

Lo anteriormente mencionado destaca que los sensores son dispositivos que tienen la capacidad de recolectar información referente al mundo real y la disponen a un sistema de control de tal manera que este pueda llegar a entender, procesar y tomar decisiones en relación con la información que está obteniendo. Un ejemplo claro lo puede reflejar un sensor de temperatura, el cual tiene la capacidad de brindar un estado de puerta abierta o cerrada, con características de velocidad de aire, humedad y nivel de CO₂. En otras palabras, la función que posee un es poder transformar los parámetros o estados físicos que se encuentren en el entorno en información traducidas a señales eléctricas que se proporcionaran a los sistemas de control. (Ayala et al., 2014)

Por otra parte, es fundamental poder incluir la relación que tienen los sensores y surcos guía de tal manera que la humedad del suelo se refiere a la cantidad de agua que retiene en un momento dado. Suele definirse en términos volumétricos, a partir de la relación entre el volumen

de agua y el volumen total o aparente del suelo. Su valor a menudo se expresa como un porcentaje que se puede obtener tanto por métodos directos (como muestreo y análisis de suelos) como indirectos (como sensores instalados en la base de las plantas que comunican su nivel de humedad en tiempo real). (N. D. Castro et al., 2016)

De acuerdo a lo anterior, (Díaz et al., 2011), en el artículo *“A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks”*, proporciona una técnica que consta de una serie de fases bien definidas que cubren todo el ciclo de vida de las aplicaciones de monitoreo agrícola de WSN (redes de sensores inalámbricos). El proyecto Grape Monitoring es una plataforma de uso de sensores para monitorear variables en la agricultura, en particular la producción de uva, donde se utilizan sensores y una aplicación WSN para posibilitar la investigación de todos los temas generados en la agricultura de precisión.

4.1.2.1 SENSOR ANALÓGICO

Este tipo de sensor puede asumir cualquier valor en su sello de salida con el tiempo, siempre que permanezca dentro de su rango operativo. Estas variables son medidas por elementos sensibles que utilizan circuitos electrónicos no digitales. (Wendling, 2010)

4.1.2.2 SENSOR DIGITAL

Este tipo de sensor solo puede tomar dos valores en su sello de salida en el transcurso del tiempo, lo que puede interpretarse como 0 o 1. Naturalmente, no hay magnitudes físicas que adopten estos valores, pero sí aparecen en el sistema de control después de ser convertido por un circuito electrónico (generalmente un comparador). Por ejemplo, puede usarse para detectar objetos en movimiento, así como algoritmos para determinar la distancia y la velocidad. (Wendling, 2010).

4.1.3 TRANSDUCTORES

Un transductor se define como un dispositivo capaz de convertir una variable física en otra con un dominio diferente. Se puede decir que un transductor es una parte de un sensor o un actuador basado en esta definición; sin embargo, la diferencia entre un sensor, un actuador y un transductor es que el transductor simplemente cambia el control de la variable, mientras que el sensor proporciona una salida útil para ser utilizada como variable de entrada a un sistema de procesamiento de información, y el actuador es responsable de ejecutar el comando.

Dicho de otra manera, un transductor cambia la variable física medida por un sello eléctrico; sin embargo, esto no siempre sucede. Consideremos una báscula, de la que hay dos tipos: electrónica y mecánica. En el caso de las básculas electrónicas, el trabajo del transductor es convertir el peso de un objeto en una señal eléctrica que pueda interpretarse posteriormente, mientras que, en las básculas mecánicas, el transductor convierte el peso del objeto en una señal mecánica que pueda interpretarse posteriormente. En general, un transductor es capaz de convertir una variable física en un movimiento, una presión, un flujo, un sello eléctrico, etc. (Ramírez et al., 2014)

(Arcos, 2018), ofrece un prototipo de riego automatizado que utiliza Arduino y sensores para detectar parámetros como la humedad del suelo y la temperatura ambiente y luego realizar el riego en función de su condición. El sistema de riego sugerido también mantiene cada una de las lecturas en una base de datos básica. El servidor web local proporciona una interfaz simple para configurar los parámetros operativos y ver los registros. El acceso al entorno web local se restringe mediante un usuario y contraseña.

Otro estudio digno de mención fue realizado por la Universidad Distrital, que creó y probó un sistema modular de bajo costo para monitorear los factores ambientales en un invernadero. El

sistema emplea el protocolo ZigBee y una red inalámbrica de sensores para recopilar datos de humedad, temperatura y luminancia en tiempo real, así como informes anteriores. El sistema creado puede enviar información a una tasa del 70% al 100% de los paquetes recibidos. Además, en comparación con los sistemas comerciales con características idénticas, la solución sugerida ahorra alrededor del 87 por ciento del dinero. (García et al., 2017).

4.2 SISTEMA DE RIEGO

El monitoreo del contenido de agua en el suelo es fundamental para ayudar a los agricultores a optimizar la producción, conservar el agua, reducir los impactos ambientales y ahorrar dinero. Monitorear el contenido de humedad del suelo puede ayudar a tomar mejores decisiones cuando se trata de programar el riego, como determinar la cantidad de agua a usar y cuándo usarla. También puede ayudar a hacer coincidir la cantidad de agua requerida por el cultivo con la cantidad aplicada por el sistema de riego, evitando pérdidas excesivas de acuíferos por percolación profunda, escurrimientos, o simplemente aplicando una cantidad insuficiente. (Enciso et al., 2007)

4.2.1 *SENSORES DE HUMEDAD*

Las moléculas de agua cambian la longitud de los materiales orgánicos, la conductividad y el peso de los materiales higroscópicos y absorbentes químicos, además de la impedancia de casi cualquier sustancia. Estos cambios se incluyen en los métodos o principios de instrumentación para la medición de humectantes. Como resultado, el contenido de agua puede determinarse eliminando el agua (vapor) de una muestra y midiendo el cambio de peso. Otros principios importantes incluyen la evaporación de agua sobre una superficie con una corriente de gas (psicrometría) y el enfriamiento de una muestra de gas hasta que se detecta la condensación. (Metas & Metrologos Asociados, 2008)

4.2.1.1 SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD INTEGRADO

El uso de procesos industriales de fabricación de CMOS permite la integración del sensor y una parte del proceso de sellado electrónico en un solo chip, al mismo tiempo que garantiza una alta confiabilidad y una excelente estabilidad a largo plazo. Este sensor permite medir la temperatura y la humedad del ambiente; es esencialmente un sensor capacitivo para medir la humedad y un termistor de temperatura. (L. B. Castro, 2016)

4.2.1.2 SENSORES CAPACITIVOS

Los sensores capacitivos (polímero orgánico capacitivo) se diseñan a menudo con platos paralelos con electrodos porosos o filamentos enredados en el sustrato. Con los cambios de humedad, el material dieléctrico absorbe o elimina el vapor de agua ambiental. Los cambios en la constante dieléctrica provocan una variación en el valor de la capacitancia eléctrica del dispositivo, resultando en una impedancia que varía con la humedad. Un cambio del 30 por ciento en la constante de CC (capacidad de carga) corresponde a una variación de HR (humedad relativa) de 0...100 por ciento en la humedad relativa. El material del sensor es muy delgado, lo que permite cambios significativos en el sellado del sello con la humedad, lo que permite que el vapor entre y salga de manera más continua y fácil, con la inclusión de un secado fácil para la efectiva calibración del sensor. (L. B. Castro, 2016)

4.2.1.3 SENSORES MECÁNICOS

El objetivo de este tipo de sensor es aprovechar los cambios de dimensión que experimentan ciertos tipos de materiales cuando se exponen a la humedad. Algunas fibras orgánicas, como el cabello humano, la piel de animales, la madera y el papel, así como las fibras sintéticas, como el nailon, son las más afectadas. Cuando aumenta la humedad relativa, las fibras aumentan de tamaño o se alargan. En consecuencia, esta deformación debe ser amplificada de

alguna manera (por palancas mecánicas o circuitos electrónicos) y graduada de acuerdo con la proporcionalidad con la humedad relativa. (L. B. Castro, 2016)

4.2.2 RIEGO POR GOTEO

El riego por goteo localizado, se convirtió en una herramienta tecnología útil que transporta el agua a través de una red de tuberías y la distribuye a las plantas a través de emisores ubicados en la zona radicular de la misma, es uno de los sistemas de riego más utilizados en la actualidad. Para la instalación de un sistema de riego automatizado localizado de goteo, se requieren una serie de componentes básicos; como primer elemento, debe estar disponible una fuente adecuada de agua de riego; El sistema hidráulico está compuesto por una unidad de bombeo, un sistema de filtrado, una unidad de fertilización, un tubo conductor y emisores. Para la automatización del sistema se requiere de instrumentos de control (Motobomba, electroválvulas e inyectores de fertilizantes) y de medición (VWC (contenido volumétrico de agua), pH, CE y temperatura, entre otros) que sean manejados por un sistema electrónico. (Villegas & Casadiego, 2019)

Destacando lo anteriormente expuesto, es importante recalcar que los mantenimientos de los jardines domésticos en la sociedad actual, poseen una gran dificultad debido a que estos se deshidratan por falta de agua. Para evitarlo, se propone diseñar un sistema de riego automático que combine soluciones de hardware y software de código abierto para medir la humedad del suelo y del aire, gracias a que estas dos partes conforman el ecosistema agrícola. A esta solución se le agregó un microcontrolador que sirve como centro de comando para asegurar el suministro y dosificación de agua para mantener una planta hidratada. Como se mencionó anteriormente, esta solución incluye una aplicación móvil que establece un canal de comunicación con el microcontrolador mediante tecnología Bluetooth, lo que permite la transmisión y recepción de señales generadas por los sensores del sistema y reduce los costos de mano de obra. Cabe resaltar

que el problema que aborda este proyecto es la falta de disponibilidad de las personas para mantener hidratados sus huertos o jardines domésticos, es decir, para evitar que se deterioren por falta de hidratación. Es vital reconocer que muchas personas disfrutan el poder hacer su propia jardinería, ya sea con plantas ornamentales en jardines o creando setos para hortalizas, y que esto les permite reducir sus niveles de estrés y mejorar su salud. Sin embargo, a la hora de cuidar las plantas, son muchos los que optan por contratar personas para el cuidado de sus jardines, mientras que otros ceden el tiempo para hacerlo, lo que se traduce en una pérdida de control y cuidado de estas. El sistema de riego automático ha sido desarrollado para su uso en huertos verticales. No obstante, la solución puede utilizarse en cualquier tipo de cultivo cuando la superficie de terreno no sea demasiado grande, como por ejemplo en las zonas verdes de las casas. Cabe señalar que el sistema de recirculación permite la reconversión del agua, la cual es auxiliada por una bomba sumergible que incluye una solución nutritiva hidropónica. Una de las principales motivaciones para desarrollar el proyecto es el costo de la automatización. En comparación con otras plataformas, el uso de la plataforma Arduino contribuye a la economía al hacer accesibles datos precisos, la implementación de sistemas de control y la flexibilidad de crear programas sobre la marcha para administrar datos.(GUIJARRO et al., 2018)

(John, 2016), proporciona otro proyecto de red de sensores inalámbricos de bajo costo para la agricultura de precisión, en el que describe cómo se pueden usar los protocolos de enrutamiento de fuente para crear redes de sensores inalámbricos (WSN) a bajo costo y hacerlos baratos para los agricultores. Modificado (MSR), utilizando un enfoque de localización básico probado por hardware y un programa de simulación basado en fuentes sin rangos

Dentro de otra investigación relevante es necesario mencionar que el seguimiento del contenido de agua en el suelo es una herramienta útil para aumentar la eficiencia de la aplicación

agrícola en tierras de regadío. La agricultura moderna y el desarrollo de sistemas de rehidratación de alta frecuencia, como los de goteo y micro aspersión, requieren mediciones rápidas, precisas y automatizadas para realizar un seguimiento del contenido de humedad del suelo. Para lograr lo anterior se requieren técnicas, instrumentos y herramientas adecuadas, como por ejemplo el sensor de resistencia-tensión del potencial hídrico del suelo Watermark Modelo 200SS (Irrometer Company, Inc.), que es versátil, fácil de instalar y preciso respecto a la medición del potencial mátrico en la retención de suelo agua. Este elemento es un ejemplo de muchos artefactos que contribuyen con el mejoramiento y la eficacia del suministro de agua para los cultivos de nuestros campesinos. Varios de estos sensores fueron evaluados y calibrados usando el método gravimétrico en condiciones de clima frío para determinar su variación en PMS, temperatura y su variación en una variedad de tipos de combustibles de varios lugares. Se determinaron la textura, la densidad aparente, la densidad real y la variación en el contenido de húmedo a varias tensiones. Los sensores y tensiómetros se instalaron a dos profundidades del suelo de 0,30 y 0,60 m, y los contenidos de humedad del suelo se compararon con las lecturas registradas con tensiómetros directos. (Medina, 2018)

Otro aspecto importante para evaluar la tasa de transpiración actual que puede poseer un cultivo, el índice de estrés hídrico del mismo se obtiene midiendo la temperatura del dosel y el déficit de presión de vapor. El enfoque de la técnica ha encontrado utilidad en regiones áridas y semiáridas ya que el equipo necesario para su ejecución es fácil de usar. Este método también puede aplicarse a cultivos que requieran riego durante la estación seca en lugares húmedos con intensa radiación solar. El índice de estrés hídrico del cultivo se basa en la teoría del balance de energía superficial, las funciones lineales del diferencial de temperatura entre el cultivo y el aire, y el déficit de presión de vapor, todos los cuales dependen del cultivo y las condiciones

atmosféricas. (Rendón et al., 2018). Para la estimación del estrés hídrico, la programación del riego y la predicción del rendimiento, la termometría infrarroja es un método sencillo, práctico y fiable que varios investigadores han aplicado en sus estudios.

De acuerdo con lo anterior, en el artículo “Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas” (Rendón et al., 2018), se evaluaron los elementos teóricos y metodológicos del índice de estrés hídrico de cultivos, así como su uso práctico en la planificación de la recarga de aguas subterráneas y la eficiencia en la producción agrícola.

El papel que juega la interacción del tipo de suelo y las diferentes características físicas del mismo se enmarcan en la siguiente investigación puesto que el objetivo principal del estudio fue evaluar la dinámica del potencial mátrico en estados mojado y secado en tres andisoles de las regiones VIIa, IXa y Xa de Chile, así como dos tipos de uso, bosque y pradera. Luego de simular un riego de 30 mm, se monitoreó el avance del frente de agua en suelos no alterados durante 24 horas utilizando un nivel freático artificial. Durante un periodo de 24 horas se monitoreó la variación del potencial mátrico utilizando el mismo sistema de sensores. También se determinó la distribución de poros de todos los suelos en estudio. Los frentes de avance tardaron entre 8 y 16 minutos en distribuirse dentro del perfil del sotobosque, tiempo que correspondió a la distribución del tamaño de los poros. El uso más intensivo de la pradera resultó en una reducción de la porosidad total y drenaje del suelo, así como un aumento en el tiempo de distribución del agua y un gradiente de potencial más desigual. Después de 24 horas, la distribución de potenciales alcanzó un equilibrio con un nivel freático idéntico a la distribución previa a la aplicación del riego para todos los suelos y ambos usos. (Nissen et al., 2005)

5 MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO CONCEPTUAL

5.1.1 HUMEDAD DEL SUELO

La humedad del suelo cumple un papel muy importante en el comportamiento de las propiedades biológicas, químicas y físicas del suelo, debido a que el agua del suelo transporta sustancias a través de sus perfiles. Los suelos contienen diferente cantidad de agua de acuerdo con su estructura y textura. El límite inferior de almacenamiento del suelo se denomina punto de marchitamiento permanente (PMP) por otra parte el límite de almacenamiento superior se denomina capacidad de campo (CC). El PMP se define como el contenido de humedad del suelo en el que la planta ya no puede absorber agua, haciendo que esta se marchite. Por otra parte la CC se define como la humedad del suelo. (Zotarelli et al, 2013).

5.1.2 GEOESTADISTICA

Este método es utilizado en las ciencias medioambientales para comprender y proporcionar información científica de fenómenos, en la toma de decisiones. Es una subdisciplina de la estadística espacial, que se basa en los procesos de tendencia aleatoria de una o varias variables y en medidas estadísticas como, la varianza, la desviación estándar, la correlación de espacio-tiempo y la media. (Rebollo, 2015)

5.1.3 INTERPOLACIÓN DE DATOS

La interpolación de datos es un método estadístico en el que se utilizan valores calculados relacionados para estimar un valor desconocido no calculado o el rendimiento de un potencial valor, en el fondo la interpolación no es más que un concepto matemático que es usado generalmente en un conjunto de datos coherentes y con ellos se puede estimar de manera razonable el valor del conjunto de datos que no se han calculado. Últimamente este método se ha utilizado

en campos de la ingeniería y ciencia, como Deep learning o regresión estadística. Existen diferentes tipos de interpolación como: interpolación lineal, polinomial y de splines y sistemas de interpolación más complejos como el método kriging y el método IDW (ponderación de distancia inversa).

5.1.4 XBEE ZIGBEE

La zigbee se define como la especificación de un grupo de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radio fusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 el cual es un estándar que define el nivel físico y el acceso medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (low-rate Wireless personal area network, LR-WPAN). La tecnología de la Zigbee, bajo el estándar de la IEEE, dentro de sus capas de trabajo, define tres bandas de frecuencia de usos libres, gestionadas según la zona, 16 canales a 2,4 GHz, 10 canales a de 902-928 MHz y un canal a 868-870 MHz. Las velocidades máximas de datos para cada una de las bandas es, 250 kbps, 40 kbps y 20 kbps, respectivamente, existen otro tipo de características generales que podemos observar en la siguiente tabla.

Especificación	Xbee Zigbee S2	Xbee-PRO
Alcance Interior/Urbano	Hasta 60 m o 200 ft	Hasta 90 m o 300 ft
Línea de Visión de RF al Aire Libre	Hasta 1200 m o 4000 ft	Hasta 3200 m
Transmisión de Potencia Solida	5.2 mW (+8 dBm), modo Boost 3.1 mW (+5 dBm), nivel máximo en el canal 26, normal de (+3 dBm)	63mW (+18 dBm)
Tasa de datos Velocidad RF	250 Kbs	
Tensión de Alimentación	2.1 – 3.6 V	2.7 – 3.6 V
Bandas o Frecuencia de Operación	ISM de 2.4 a 2.5 GHz (Es Latinoamérica)	

Tabla 1: características de la xbee zigbee

MODOS DE OPERACIÓN XBEE

Los módulos de radio Xbee tienen dos modos de operación:

MODO DE APLICACIÓN DE PROGRAMACIÓN (API)

Es una metodología de trabajo más robusta, que guarda dentro de un protocolo, la trama de datos enviados, por series de paquetes organizados, tiene unas ventajas por encima del modo transparente, entre estas esta la configuración de dispositivos de forma remota mediante XCTU y comandos Hayes propios de Xbee, también permite la creación de arquitecturas de red más amplias, ya que puede identificar los orígenes de las comunicaciones, la velocidad y la estructura.

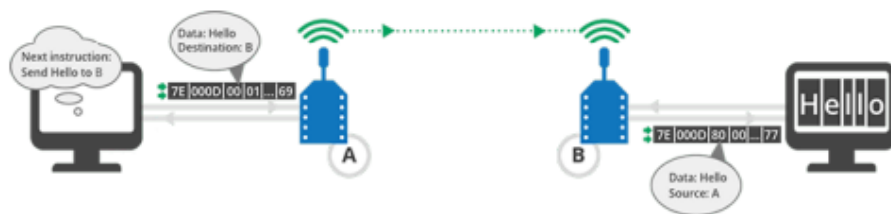


Imagen 1: Modo de operación API

MODO TRANSPARENTE (AT)

El módulo recibe información y la transmite como originalmente la recibió por los puertos seriales, este es un modo adecuado para comunicar dos módulos configurando las direcciones de destino. Aunque este modo es muy usado, tiene sus limitaciones respecto a sus aplicaciones, pues es específica para comunicación punto a punto, debido a esto no permite la programación remota, ni envío de tramas de datos, por lo que no se reconoce el punto de origen del envío.



Imagen 2: Modo de operación AT

5.3 MARCO TEÓRICO

5.3.1 ANÁLISIS DE KRIGING

Esta técnica de interpolación de datos es de la familia de la geoestadística, basada en regresiones estadísticas bajo modelos tipo gaussiano (Sharma et al, 2021). Los usos de esta técnica se extienden desde la geología hasta las ciencias ambientales y de suelos, a lo largo del tiempo esta técnica ha tenido que ajustarse a diversos tipos de datos, dentro de los métodos de kriging más comunes se encuentran: kriging universal, kriging ordinario y cokriging para análisis de datos estacionarios y no estacionarios.

Es un análisis determinista, que tiene como principio fundamental el funcionamiento del método IDW (Inverse Distance Weighting) los cuales se observan en la siguiente formula:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=0}^N \lambda_i Z(S_i)$$

Ecuación 1

Donde $Z(s_i)$ es el valor medido en la ubicación i , λ_i es una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i , s_0 es la ubicación de la predicción y N es la cantidad de valores o puntos medidos de esta manera el método permite evaluar las direcciones y distancias entre las muestras de la variable, también se tiene en cuenta para el análisis variográfico la disposición espacial de

los puntos medios, con esos datos se da la ponderación o pesos a cada punto que debe cumplir con la relación de la siguiente ecuación.

$$\sum_i^N \lambda_i = 1$$

Ecuación 2

Por otra parte para determinar la dependencia espacial de las muestras se hace el cálculo del variograma experimental o semivariograma empírico, mediante el cual se estima el variograma general que será la ecuación matemática que define los contornos del mapa de diferencias

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} (Z_x - Z_{x+h})^2$$

Ecuación 3

$$\gamma E^{(h)} = \frac{1}{2 \cdot N(h)} \cdot \sum_{i=1}^{N(h)} (Z_{ix} - Z_{xi+h})^2$$

Ecuación 4

Donde N (h): número de pares de un mismo punto separado por una distancia h

Es importante mencionar que para ejecutar la estimación de kriging, la distribución de los puntos debe asemejarse a una campana gaussiana para evitar errores de precisión y dar más exactitud al resultado

5.3.2 ANÁLISIS VARIOGRAFICO

Un análisis variografico es utilizado para la interpretación de la continuidad espacial de la variable de estudio, un variograma lo que hace es describir la correlación espacial entre los puntos conocidos dentro de un área o un plano analizado. Existen diferentes tipos de variogramas como lo son: los variogramas lineales, los variogramas exponenciales, los variogramas gaussianos y esféricos. Estos variogramas relacionan las funciones matemáticas al variograma experimental para poder crear el modelo geoestadístico e interpolar los datos.

EFECTO PEPITA

Un variograma pepitico cuya meseta es C se define como

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ C & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Ecuación 5

Este variograma se define por la falta de una correlación espacial, por esta razón en este variograma se logra de forma inmediata la meseta.

MODELO ESFÉRICO

Un variograma tipo esférico de alcance a y cuya meseta es C se define:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left\{ \frac{3}{2} \frac{|h|}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{|h|}{a} \right)^3 \right\} & \text{si } |h| \leq a \\ C & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Ecuación 6

Este tipo de variograma identifica una variable que esta regionalizada de forma continua, cuyo alcance varía según la forma de datos

MODELO EXPONENCIAL

Este tipo de variograma de alcance a y cuya meseta es C se define:

$$\gamma(h) = C\{1 - e^{(-\frac{|h|}{a})}\}$$

Ecuación 7

Este modelo solo tiene comportamiento asintótico con respecto a la meseta. En general este tipo de variograma logra alcanzar un 95% de su meseta en un alcance práctico de $3a$

MODELO GAUSSIANO

Este tipo de variograma de alcance a y cuya meseta es C se define:

$$\gamma(h) = C \left\{ 1 - e^{(-\frac{|h|^2}{a^2})} \right\}$$

Ecuación 8

Este tipo de variograma tiene gran relación al modelo exponencial debido a que se consigue llegar a la meseta asintóticamente donde su alcance es forma práctica se considera $a\sqrt{3}$

BALANCE HÍDRICO

ECUACIÓN GENERAL

El balance hídrico se refiere a que la cantidad total de agua que recibe un sistema, debe ser igual a la cantidad de agua que sale del mismo.

$$P = ET + E + I + (\Delta HS)$$

Ecuación 9

P = Precipitación

ET = Evapotranspiración

E = Escorrentía

I= Infiltración

ΔHS = Cambio en la humedad del suelo ($H_f - H_i$)

H_f = Humedad final

H_i = Humedad inicial

Los cálculos de balance hídrico se pueden llevar a cabo en periodos mensuales, decadales o diarios.

INFORMACIÓN BÁSICA PARA EL CÁLCULO DE BALANCE HÍDRICO

PRECIPITACIÓN

La precipitación es un parámetro muy importante para el cálculo del balance hídrico, esta variable climatológica se suele obtener por medio de las estaciones climatológicas de la zona de estudio, ya que se pueden obtener datos mensuales, anuales y diarios de la precipitación para poder tabular estos datos y tener la variable principal para el cálculo de balance hídrico.

Pero en este proyecto esta variable climatológica se reemplazó por el riego por goteo, debido a que el estudio de este proyecto se está realizando en cultivos de tomate bajo invernadero, por esta razón se reemplazó la variable climatológica.

BALANCE HIDROLÓGICO DE THORNTHWAITE

Este balance se puede establecer de acuerdo a la oferta de agua por precipitación, la demanda atmosférica de agua (ETP) y el almacenaje de agua en el suelo (Alm), con estas variables se puede obtener el valor real de la evapotranspiración.

$$P - ER (+ \text{ } / - \Delta \text{Alm}) - \text{Exceso} = 0$$

Ecuación 10

Fundamentos de este método

La precipitación va directamente al suelo

En suelo pierde y gana agua gracias a que es un recipiente homogéneo

Considera el almacenaje total de suelo (no el agua útil)

No considera el escurrimiento superficial, ni la percolación profunda.

No considera una relación exponencial entre la demanda de agua y el almacenaje de agua del suelo.

Este tipo de balance se puede aplicar a diferentes tipos de suelo a partir de la existencia de tablas de retención para distintas capacidades máximas de almacenaje.

ECUACIONES

ÍNDICE CALÓRICO ANUAL (I)

$$1 = \sum_{Y=1}^{12} ij$$

Ecuación 11

ÍNDICE CALÓRICO MENSUAL (ij)

$$ij = \left(\frac{t}{5}\right) 1.514$$

Ecuación 12

FORMULA DE THORNTHWAITE

$$ETP = C/10(10^T_i)a$$

Ecuación 13

ETP: evapotranspiración mensual (mm)

T: temperatura media mensual

a: 6.75×10^{-7} , $I_3 - 7.71 \times 10^{-5}$, $I_2 + 0,01792 + 0,49239$

I: índice calórico

Cj: coeficiente de ajuste para cada mes en función del número de días del mes y heliofania astronómica promedio del mes

5.4 MARCO LEGAL**5.4.1 NORMATIVA PARA REDES WSN**

Para la realización de este proyecto se consideran los aspectos legales sobre la comunicación inalámbrica, en el caso del proyecto para la red WSN, ya que es una tecnología que usa señales de radio y tiene una asignación dentro del aspecto electromagnético para las comunicaciones entre los dispositivos de red. En Colombia los estándares que regulan ese tipo de enlaces son los protocolos IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11, son los encargados de regular las frecuencias, canales y velocidades de transmisión.

Se puede observar la siguiente tabla con las diferentes normas

Frecuencia	Velocidad (Kb/s)	Cobertura	N. canales
868-868.6 MHz	20/100/250	Europa	1
902-928 MHz	40/250	USA	10
2.40-2.48 GHz	250	Mundial	16

Tabla 2: Recomendación IEE 802.15.4

Recomendación IEEE 802.11

Versión Norma	Frecuencia (GHz)	Velocidad (Mbps)
802.11.n	2.4	108
802.11.g	2.4	54
802.11.a	5	54
802.11.b	2.4	11

Tabla 3: Recomendación IEEE 802.11

Para las herramientas de software, que se usan se basan en herramientas de software libre como arduino y XCTU para la recolección de datos y un software con licencia académica de la universidad como MATLAB para los procesos de estimación e interpolación de datos.

CULTIVO DE TOMATE

El tomate (*Lycopersicum esculentum*) es perteneciente a la familia de las solanáceas, genero *Lycopersicum*, también existen una gran variedad de especies. Su origen es de la región andina, extendiéndose desde Chile hasta Colombia (Corpoica, 2009).

Esta hortaliza es de gran importancia a nivel nacional y mundial, debido a su alta demanda en el mercado, en los últimos años esta hortaliza ha incrementado su producción debido a su aumento en el rendimiento. Según el plan hortícola nacional, el país cosecha anualmente 242.000 toneladas de tomate en un área de 8.700 Ha, una productividad entre 18 a 58 T/Ha. La producción de esta hortaliza en cultivos bajo techo, más conocidos como invernaderos es una práctica que se ha venido elaborando en el país como una alternativa a la reconversión de cultivos, logrando el aprovechamiento de áreas con muchas limitaciones y condiciones

adversas que son minimizadas, logrando unos excelentes resultados en la producción y rentabilidad de los cultivos de tomate bajo invernadero.

Según el DANE-ENA en 2013 Colombia registro un gran crecimiento en la producción de esta hortaliza, donde se cultivaron 6.867 Hectáreas, de las que se cosecharon 4.161 Hectáreas que produjeron 175.706 toneladas de tomate, en el país varios departamentos se dedican a los cultivos de tomate, Boyacá es el departamento con más producción, seguido por Cundinamarca, Norte de Santander, Antioquia, Quindío y Caldas.

5.4.2 CONDICIONES AGROECOLÓGICAS IDEALES PARA EL CULTIVO DE TOMATE

TEMPERATURA

Esta variable climatológica es de las más importantes para poder desarrollar un cultivo de tomate, debido a que esta influye en el desarrollo vegetativo de la planta, la temperatura en el día se sitúa entre los 16° y 20° °C y en la noche se sitúa entre los 22° y 30° °C (Corpoica,2013).

HUMEDAD RELATIVA O DEL AMBIENTE

La humedad relativa más favorable para los cultivos oscila entre el 50 a 65 %, debido a que si se obtiene mucha humedad esto favorece al desarrollo de enfermedades y fuertes daños en el cultivo, como por ejemplo la formación de hongos en las raíces, el manchado en las hojas, caída de flores y el daño a los frutos. Si la humedad es muy baja esto genera que las flores se sequen y no ocurra la polinización y fecundación de las flores, generando así la falta de producción en el fruto.

Esta hortaliza tiene la capacidad de adaptarse a varios tipos de suelos, pero presenta un mejor desarrollo cuando cuenta con suelos, aireados, sueltos, bien drenados y con una

excelente capacidad de retención de humedad, debido a que esta variable es de vital importancia para su desarrollo y producción.

5.4.2 ETAPAS DEL CULTIVO DE TOMATE

ETAPA DE DESARROLLO VEGETATIVO

El desarrollo y formación de esta hortaliza inicia con la etapa de desarrollo vegetativo y la etapa reproductiva, esta etapa inicia con la siembra de las semillas, seguida por la germinación donde la planta cumple un tiempo de 30 a 45 días, en los cuales inicia su crecimiento y la formación de sus hojas verdaderas donde se recomienda que sean 3 o 4 y posteriormente se realiza el trasplante del semillero al invernadero donde la planta iniciara su proceso de floración (manual cultivo de tomate, 2015)

ETAPA REPRODUCTIVA

Esta inicia a partir de la floración de las plantas, continuando con la formación y llenado de fruto hasta conseguir la madurez de la planta. Esta etapa tiene una duración de 90 días aproximadamente, donde ya se puede realizar la cosecha del fruto, el cual dura aproximadamente 75 días, el cultivo de tomate bajo invernadero tiene una duración de 200 días, desde su germinación hasta la cosecha del cultivo (manual cultivo de tomate, 2015).

5.4.3 PREPARACIÓN DEL SUELO

Cuando el lote donde se va sembrar el cultivo, no ha sido intervenido con otros cultivos o ha sido utilizado para pastoreo, se requiere el uso de maquinaria para la adecuación del terreno, se lleva a cabo una subsolada para mejorar la penetración de las raíces, la aireación y el drenaje, posteriormente se pasa el tractor que ara el suelo a una profundidad de 30 cm y también se realizan dos rastrilladas para la destrucción de terrones. Pero cuando el terreno ya ha sido utilizado para cultivos, la preparación del terreno se realiza de forma manual,

con la ayuda de herramientas como la pala, la pica y el azadón, posteriormente se procede a la elaboración de los surcos, en los cuales se abonan y se instala el sistema de riego para poder llevar a cabo el trasplante de la semilla (manual cultivo de tomate, 2015)

TRASPLANTE

Este paso se realiza de manera definitiva cuando las plantas que se encuentran en el proceso de germinación, tienen de 3 a 4 hojas verdaderas o que hayan alcanzado un tamaño de 10 a 15 centímetros de altura. Por otra parte las plantas deben presentar una coloración purpura en la base del tallo y debajo de las hojas, también que sus raíces tengan una tonalidad blanca y delgada (manual cultivo de tomate, 2015)

FERTILIZACIÓN

Para el desarrollo del cultivo es de vital importancia la aplicación de fertilizantes, los cuales son estimados de acuerdo a la cantidad de plantas y al estudio de suelo previamente desarrollado, debido a que este tipo de cultivo requiere de nitrógeno, potasio, calcio, fosforo, cobre, magnesio, zinc y boro, cabe resaltar que la relación de fertilización de potasio y nitrógeno se lleva a cabo desde el trasplante, hasta la floración y una parte de la cosecha, la aplicación de estos fertilizantes se puede realizar disolviendo en el agua por medio de los riegos o aplicar directamente en la planta, en un proceso llamado fumigación del cultivo (manual cultivo de tomate, 2015)

RIEGO

La cantidad de agua que necesita el cultivo se define de acuerdo a una serie de variables como, las condiciones climáticas de la zona determinada, el tipo de suelo y la pendiente del terreno, el sistema de riego que se recomienda para este tipo de cultivo es el de goteo, por su alta eficiencia y su ahorro de agua, la aplicación del riego se debe iniciar el mismo

momento en el que se lleva a cabo el trasplante de las plantas, posteriormente se determinan unos tiempos adecuados para realizar la aplicación del riego diariamente, para lograr la humedad del suelo necesaria para que las plantas no lleguen al punto de sufrir estrés hídrico.

6 METODOLOGÍA

En este proyecto el objetivo principal es poder determinar la humedad del suelo que tiene el cultivo, esto se logró con la implementación de herramientas electrónicas que permitieron tomar las medidas determinadas en las plantas y en el suelo. La metodología de este proyecto se llevó a cabo de manera práctica y bibliográfica, de acuerdo con teorías existentes como la del balance hídrico, también de una manera cuantitativa, donde se busca analizar una variable física como la humedad del suelo, con los datos obtenidos de un entorno de cultivo real, mediante procesos estadísticos y matemáticos, como la calibración de sensores, análisis variográficos y la interpolación de datos.

Esta metodología se realizó en varias etapas, inicialmente se determinará de manera bibliográfica la mejor teoría y herramientas electrónicas que puedan contribuir al cumplimiento del objetivo del proyecto, posteriormente se seleccionaron los cultivos que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del proyecto, se realizó el estudio y análisis requerido para determinar la aplicación de riego que se llevó a cabo en cada cultivo, para poder instalar las herramientas electrónicas y entrar a toda la parte práctica de la metodología, donde se tomaron datos y mediciones de la humedad del suelo de cada uno de los cultivos seleccionados los cuales fueron analizados y discutidos, para obtener los resultados del proyecto, dando así un concepto adecuado de la humedad del suelo, al que

son sometidos los cultivos estratégicos que fueron seleccionados, así se puede determinar el uso y la aplicación adecuada para cada uno de los cultivos

POBLACIÓN

Aplicado en 3 cultivos de tomate bajo invernadero

El primer invernadero se encuentra en etapa de crecimiento, este cuenta con un total de 5500 plantas, en el cual se llevan a cabo la aplicación de 3 riegos al día por medio de goteo, la siguiente tabla refleja el procedimiento que se realizó diariamente.

TEMPERATURA	HORA	TIEMPO DE RIEGO	VOLUMEN
12°C	7:30 AM	6 M	3.06 L
27°C	10:30 AM	6 M	3.06 L
18°C	3:00 PM	6 M	3.06 L

Tabla 4: Invernadero 1

El segundo invernadero se encuentra en etapa de desarrollo, este cuenta con un total de 7500 plantas, se realiza la aplicación de 3 riegos al día por medio de goteo

TEMPERATURA	HORA	TIEMPO DE RIEGO	VOLUMEN
9°C	8:00 AM	5 M	2.55 L
14°C	11:00 AM	5 M	2.55 L
11°C	3:30 AM	5 M	2.55 L

Tabla 5: Invernadero 2

El tercer invernadero se encuentre en etapa de producción, este cuenta con un total de 9500 plantas, se realiza la aplicación de 2 riegos al día por medio de goteo

TEMPERATURA	HORA	TIEMPO DE RIEGO	VOLUMEN
13°C	9: AM	6 M	3.06 L
20°C	2: PM	6 M	3.06 L

Tabla 6: Invernadero 3

MUESTRA

La toma de datos para este proyecto se realizó en 3 invernaderos de cultivos de tomate donde se limitaron cuadrículas de 5x5, en la vereda hato, del municipio de Miraflores, Boyacá.

ETAPAS METODOLÓGICAS

Este proyecto se desarrolló en 4 etapas las cuales tienen la finalidad de aportar al desarrollo de los objetivos planteados en el proyecto, con el uso de las herramientas electrónicas.

La primera etapa es la delimitación de las zonas de estudio en cada uno de los invernaderos como se puede observar en las siguientes imágenes.



Imagen 3: Zona invernadero 1

Fuente autor



Imagen 4: Zona invernadero 2

Fuente auto



Imagen 5: Zona invernadero 3

Fuente autor

La segunda etapa es la toma de datos en campo antes y después de la aplicación del riego en cada uno de los invernaderos y en las zonas determinadas.



Imagen 6: Toma de datos en campo antes del riego

Fuente autor



Imagen 7: Toma de datos en campo después del riego

Fuente autor



Imagen 8: Toma de datos en campo

Fuente autor



Imagen 9: Muestra en cultivo en etapa de producción

Fuente autor

En la tercera y cuarta etapa se ordenaron los datos, se interpolaron y graficaron para observar los mapas de humedad total de cada invernadero.



Imagen 10: Equipo de muestro en campo

Fuente autor

6.1.1 CALIBRACIÓN DE SENSORES

Inicialmente se calibro el sensor con el cual se toman los datos de humedad del suelo, esto con el fin de obtener unos datos más precisos. Se realizó la calibración mediante el método gravimétrico según la tesis de Oscar Fernando López Albino estudiante de la Facultad de Ingeniería Electrónica, tesis orientada por el ingeniero Edgar Andrés Gutiérrez Cáceres Docente de la facultad de ingeniería electrónica.

6.1.2 TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES

Después de tener calibrado el sensor se continuo con la toma de datos de humedad del suelo, esto se hizo en 3 invernaderos de cultivo de tomate, donde se delimito una cuadrícula 5x5, se tomaron 25 puntos con un espacio de 30.3 centímetros, este proceso se realizó antes

de aplicar el riego y después de aplicar el riego, cada uno se repitió 5 veces, para obtener una buena cantidad de datos y obtener un resultado más verídico.

6.1.3 DESARROLLO DE ALGORITMOS PARA ANÁLISIS

En esta etapa se reúnen los datos obtenidos de la etapa anterior, se inicia con un desarrollo de manera bibliográfica, usando un algoritmo que permita hacer la interpolación de la grilla de datos experimentales, se usa el entorno de MATLAB y se analizan todos los datos obtenidos, gracias a este se construyó otro programa para determinar las mejores distribuciones y ubicaciones de los sensores para la red WSN dentro del área determinada.

6.1.4 DISEÑO DE RED WSN

Con el algoritmo de colocación óptima de sensores finalizado, en esta etapa se desarrollaron los parámetros de diseño de la red, partiendo de la distribución de sensores, los sistemas a utilizar, el método de comunicación, metodología de adquisición de datos y demás aspectos necesarios, con los cuales se hicieron pruebas para asegurar su funcionamiento.

7 ANÁLISIS Y RESULTADOS

En esta sección del trabajo de tesis se presentan los resultados obtenidos de la toma de datos de humedad del suelo en campo, donde se seleccionaron 3 invernaderos de tomate en los cuales se delimitó una cuadrícula de 5x5 de manera aleatoria, en esta cuadrícula se llevó a cabo la medición de 25 puntos distintos, donde se obtuvo la medición de humedad del suelo antes de la aplicación del riego y después de la aplicación del riego, por otra parte se procede a realizar la interpolación de datos, para posteriormente con la ayuda de kriging obtener las gráficas de humedad del suelo

TRAMO 1 INVERNADERO 1

La siguiente imagen pertenece al tramo 1 del invernadero 1 definida como T1S1N antes de aplicar el riego, en esta imagen se puede observar en la parte izquierda la representación de los 25 datos originales tomados en campo, en la gráfica de la mitad se puede observar la representación de los datos al ser filtrados por el método gaussiano, en esta grafica ya se puede observar una mejor definición del comportamiento de la humedad del suelo, en la parte derecha se puede observar el mapa total de humedad del suelo del cultivo de tomate, en el cual se observa claramente que el suelo mantiene una similitud en todos sus puntos antes de aplicarle el riego.

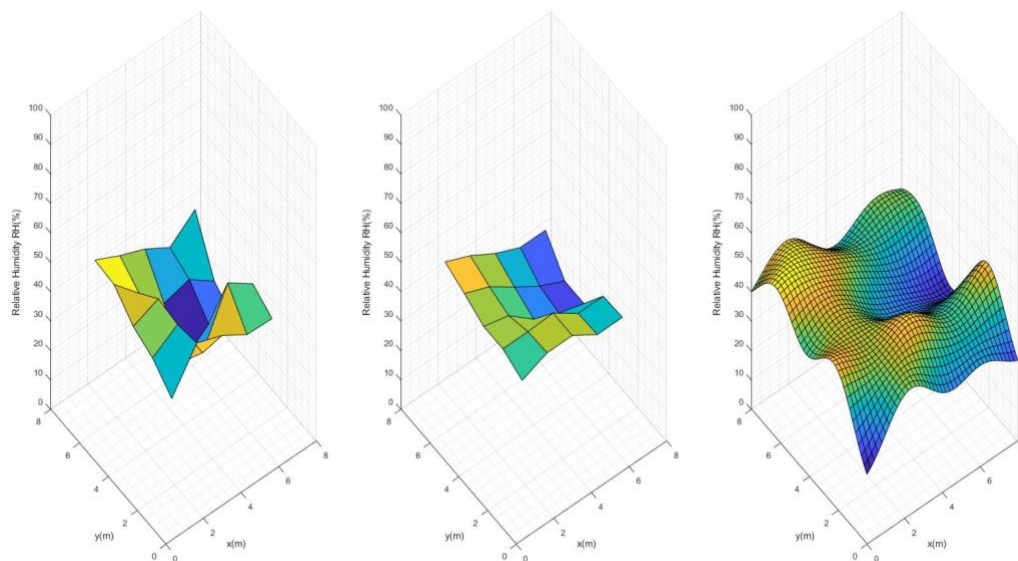


Imagen 11: Tramo 1 sector 1 antes de la aplicación del riego (T1S1N)

Fuente autor

La siguiente imagen pertenece al tramo 1 invernadero 1 definida como T1S1R después de aplicar el riego, donde se tomaron los 25 datos de humedad del suelo después de la aplicación del riego por goteo en las horas de la mañana más exactamente a las 7:30 am, en esta imagen se puede observar los cambios que sufren el suelo después de la aplicación del riego con respecto a la

imagen anterior donde se refleja la gráfica antes de la aplicación del riego, de acuerdo al procedimiento de la interpolación de datos por medio de kriging se obtiene la gráfica que se observa en la parte de abajo, en la parte izquierda están los datos originales que fueron tomados en campo, en la mitad se observa la gráfica después de haber filtrado los datos por medio de gaussian y en la parte derecha se observa el mapa total que refleja el comportamiento de la humedad del suelo en el cultivo de tomate bajo invernadero, dejando evidenciar que la aplicación del riego está siendo la adecuada para el cultivo.

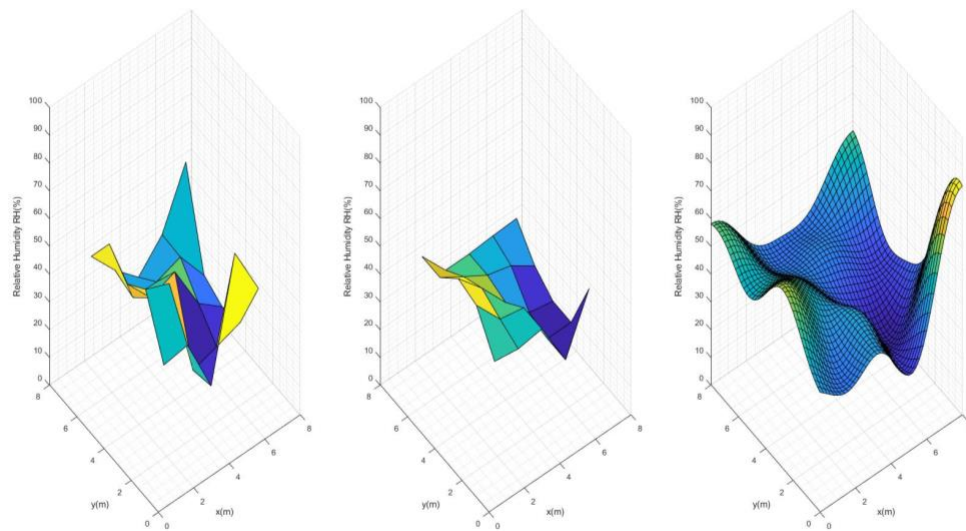


Imagen 12: Tramo 1 sector 1 después de la aplicación del riego (T1S1R)

Fuente autor

Esta imagen pertenece al tramo 1 invernadero 1 definida como TIS5N, donde se puede observar el comportamiento de la humedad del suelo antes de la aplicación del riego en la horas de la tarde, estos datos de humedad se tomaron a las 3:00 pm, se realizó la toma de 25 datos de humedad del suelo con la ayuda de un sensor electrónico y el programa arduino, en el cual se observan y guardan los datos de campo, los cuales son tomados de una manera establecida en una cuadrícula delimitada de 5X5 que es lo necesario para poder realizar el gráfico que se observa en

la parte de abajo, donde se pueden ver 3 gráficos los cuales hacen referencia a la toma de datos originales en la parte izquierda, mientras que la gráfica de la mitad hace referencia al resultado de filtrar los datos por medio de gaussian, finalmente en la parte derecha de la imagen se observa el mapa total de humedad del suelo antes de la aplicación del riego, donde se observa un comportamiento muy similar en todos los puntos, eso quiere decir que el suelo mantiene una humedad promedio.

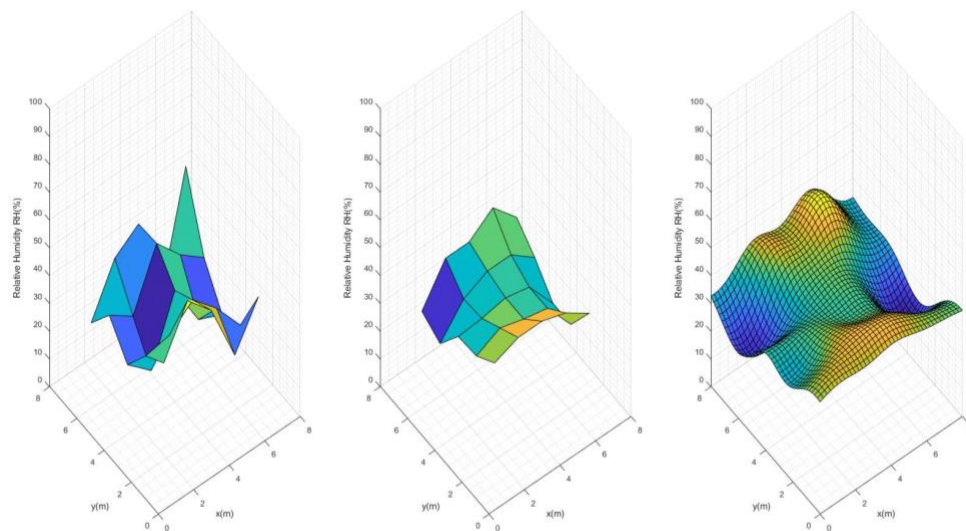


Imagen 13: Tramo 1 sector 5 antes de la aplicación del riego (T1S5N)

Fuente autor

Esta imagen está definida como T1S5R que hace referencia a la toma de datos del tramo 1 sección 5 después de aplicar el riego por medio de goteo, en esta sección se llevó a cabo la aplicación del riego que corresponde a 6 minutos por cuadrícula, para posteriormente realizar la toma de los 25 datos de humedad del suelo con la ayuda de un sensor electrónico y el programa arduino, este sirve para poder interpolar los datos por medio de kriging y obtener las gráficas que observamos en la parte inferior, estas graficas tienen relación con las gráficas anteriores debido a que esta toma de datos se llevó a cabo antes y después de la aplicación del riego. Comparando las dos imágenes

podemos observar los cambios que sufre el suelo al momento de la aplicación del riego, la humedad de este varia y podemos evidenciarlo en las gráficas, donde se puede ver un mejor comportamiento, gracias a esto se puede definir que el riego se aplicó de manera adecuada.

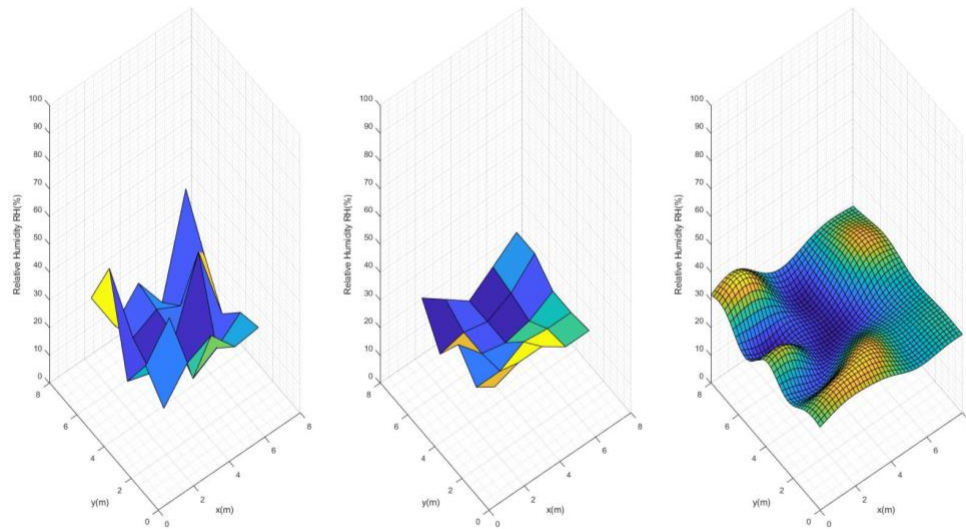


Imagen 14: Tramo 1 sector 5 después de la aplicación del riego (T1S5R)

Fuente autor

TRAMO 2 INVERNADERO 2

En el invernadero número 2 se delimito una cuadrícula de 5X5 en una zona aleatoria de todo el cultivo, para llevar a cabo la medición de humedad del suelo, en este invernadero se llevaron a cabo mediciones de humedad del suelo antes y después de la aplicación del riego por medio de goteo, estas mediciones se realizaron durante 7 días, haciendo 3 tomas diarias de acuerdo al horario establecido por el agricultor en la aplicación del riego, la primera muestra se tomaba a las 7:30 am, antes y después de la aplicación del riego, la segunda muestra se tomaba a las 10:30 am, de igual manera antes y después de la aplicación del riego y la última muestra se tomaba a las 3:00 pm antes y después de aplicar el riego, este procedimiento se llevaba a cabo diariamente, durante los 7 días ya mencionados, en cada toma de muestras se obtenían 25 datos de humedad del suelo antes

y después de la aplicación del riego, posteriormente estos datos se ordenaron en un Excel y con ayuda de kriging se realizó la interpolación de datos para poder obtener las gráficas que nos representar el comportamiento de la humedad del suelo.

Las gráficas que podemos observar en la parte inferior, nos representan todo el proceso que se desarrolló en la toma de cada muestra en su horario determinado , en la parte izquierda se puede observar la gráfica de humedad del suelo con los datos originales, en la gráfica de la mitad se puede observar la aplicación del método gaussian en los datos de humedad del suelo y en la parte derecha podemos observar el mapa total de humedad del suelo de todo el cultivo, esta grafica se representa en 3D, cabe resaltar que las gráficas que se pueden observar son las mejores de todas las muestras que se tomaron antes de la aplicación del riego.

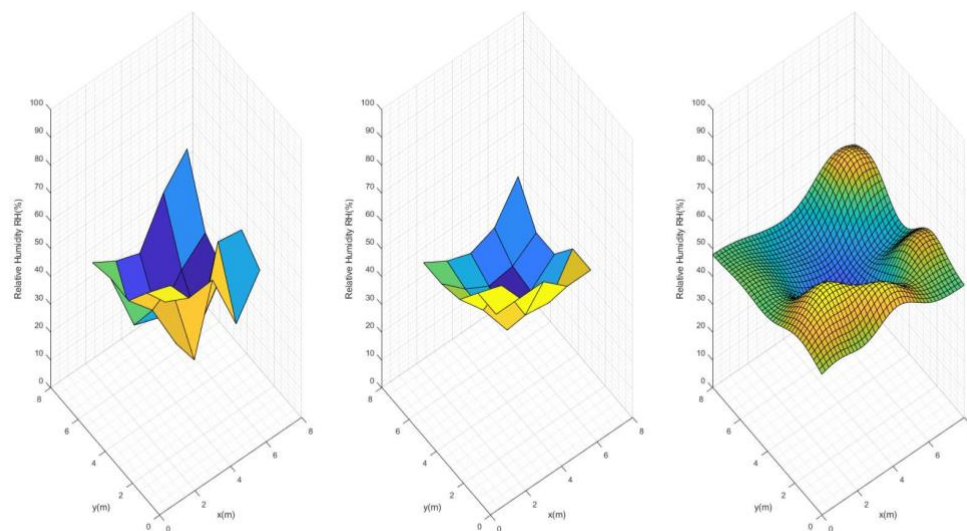


Imagen 15: Tramo 2 sector 1 antes de la aplicación del riego (T2S1N)

Fuente autor

Las gráficas que se puede observar en la parte inferior representan la toma de datos que se llevó a cabo después de la aplicación del riego en las horarios determinados por los agricultores, para esta muestra se tomaron 25 datos que son los necesarios para poder establecer un resultado

de humedad del suelo, estas muestras se hicieron con la ayuda de un sensor electrónico que permite medir la humedad del suelo, posteriormente se ordenaron los datos en un Excel, después con ayuda de kriging, se obtuvieron las gráficas que se pueden ver en la parte inferior, donde nos representa la transformación en los gráficos, de izquierda a derecha se inicia con los datos originales, después la interpolación de datos y por último el mapa completo de la humedad del suelo en el área determinada.

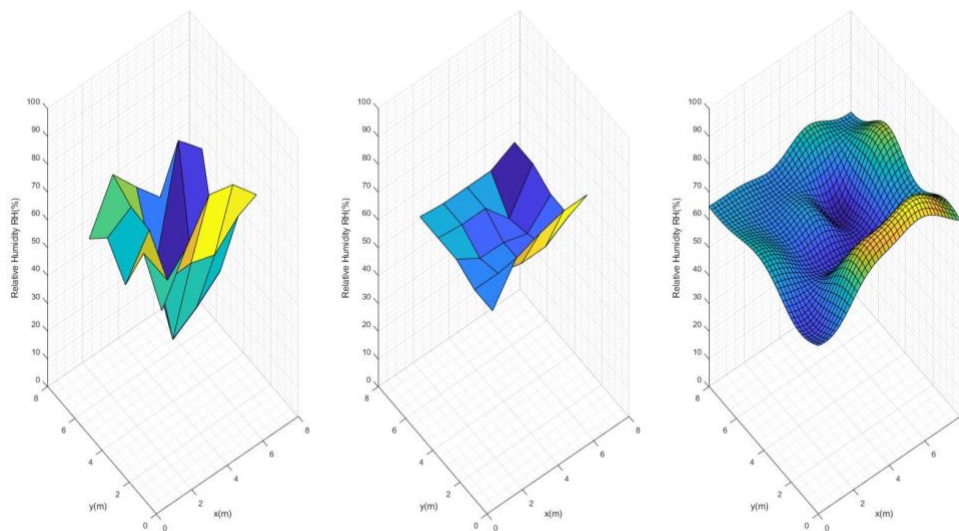


Imagen 16: Tramo 2 sector 1 después de la aplicación del riego (T2S1R)

Fuente autor

En el tramo 2 del invernadero 2, se tomaron unas muestras de manera diferente para evidenciar el cambio en el comportamiento de la humedad del suelo del cultivo, también para verificar si el riego se aplicaba de la misma manera en todas las zonas del cultivo, por esta razón se delimito una cuadrícula de 5X5 en la cual se tomó una muestra de datos diferente, en esta parte se inició en la esquina de la cuadrícula y se tomaron los datos en la mitad de la cuadrícula esta toma se realizó por varios días para poder obtener una cantidad de datos confiables.

Las dos graficas que se observan en la parte inferior son la representación de la toma de datos de esta cuadrícula, antes y después de la aplicación del riego en los horarios determinados por los agricultores, en estas graficas se pueden observar comportamientos diferentes y algunos puntos atípicos, esto sucede porque la aplicación del riego de esta zona se modificó y se cambió de tipo goteo a aspersión, por lo cual para este tipo de cultivos no es recomendable debido a que con riego por aspersión en suelo no capta el agua necesaria para poder alimentar las plantas, en el cultivo de tomate es muy necesario que el agua filtre muy bien en el suelo, debido a que las plantas de tomate se alimentan por sus raíces y el agua es un factor de vital importancia para este tipo de cultivo.

Las gráficas están ordenadas de izquierda a derecha la imagen definida como T2S5N hace referencia a la toma de datos antes de la aplicación del riego, donde se puede evidenciar el mapa total de humedad de la zona delimitada, la imagen T2S5R hace referencia a la representación de humedad del suelo después de la aplicación del riego, que en este caso se llevó a cabo por el modelo de aspersión.

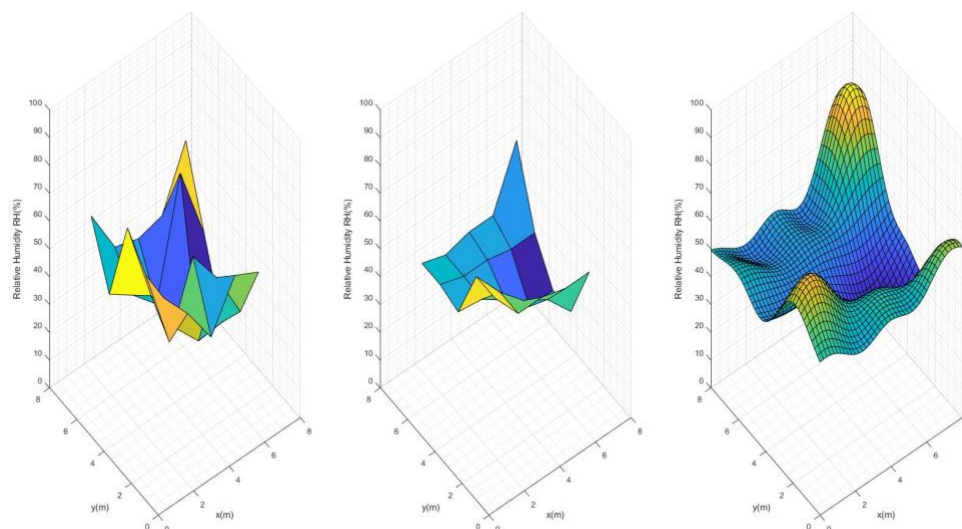


Imagen 17: Tramo 2 sector 5 antes de la aplicación del riego (T2S5N)

Fuente autor

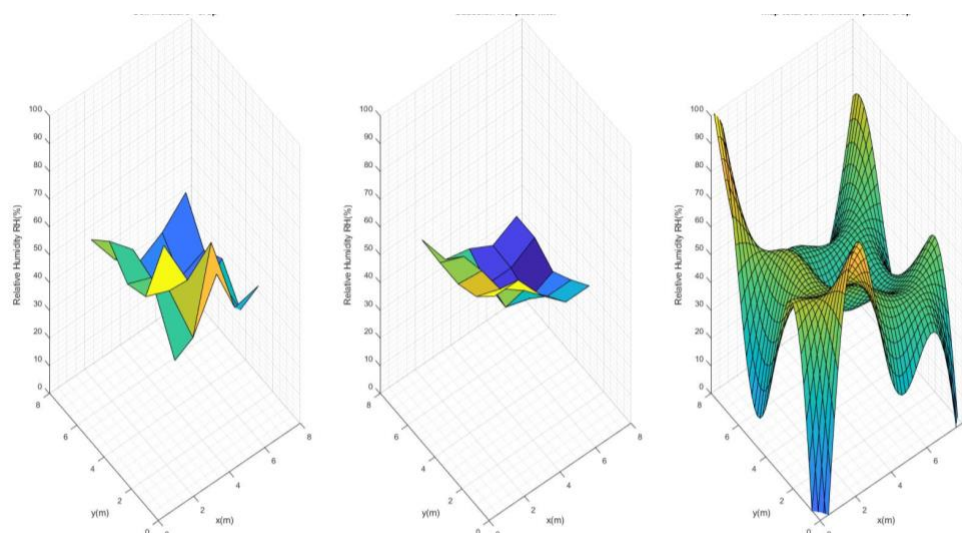


Imagen 18: Tramo 2 sector 5 después de la aplicación del riego (T2S5R)

Fuente autor

TRAMO 3 INVERNADERO 3

En el invernadero número 3, también se tomó una área aleatoria en la cual se delimitó una cuadrícula de 5X5, para llevar a cabo el procedimiento de humedad del suelo en el cultivo de tomate bajo invernadero. En este invernadero se realizaron tomas diferentes con respecto a los 2 invernaderos anteriores, en este solo se llevó a cabo la aplicación de 2 riegos por día, mientras que en los anteriores se realizaban 3 riegos diarios, en este invernadero se tomaban las muestras a las 9:30 am y a las 2:30 pm, antes y después de la aplicación del riego. La imagen T3S1N es la representación de la humedad del suelo antes de la aplicación del riego por goteo, en esta se tomaron 25 datos de humedad del suelo, los cuales fueron ordenados en Excel, posteriormente se interpolaron y se graficaron, se obtuvieron las gráficas que se pueden observar en la imagen T3S1N.

La imagen T3S1R hace referencia a la representación gráfica de la toma de datos de humedad del suelo después de la aplicación del riego por medio de goteo. Para esta muestra se tomaron los mismos 25 datos de humedad del suelo antes y después de la aplicación del riego, cabe resaltar que los puntos tomados, son exactamente los mismos antes y después. En la imagen T3S1R se pueden observar las gráficas que son el resultado de la humedad de suelo de la zona delimitada en el cultivo de tomate bajo invernadero.

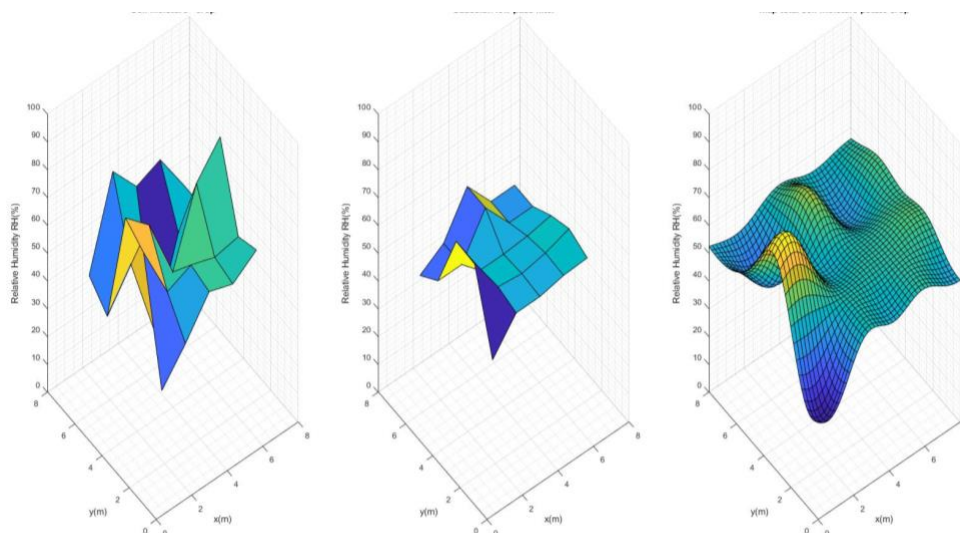


Imagen 19: Tramo 3 sector 1 antes de la aplicación del riego (T3S1N)

Fuente autor

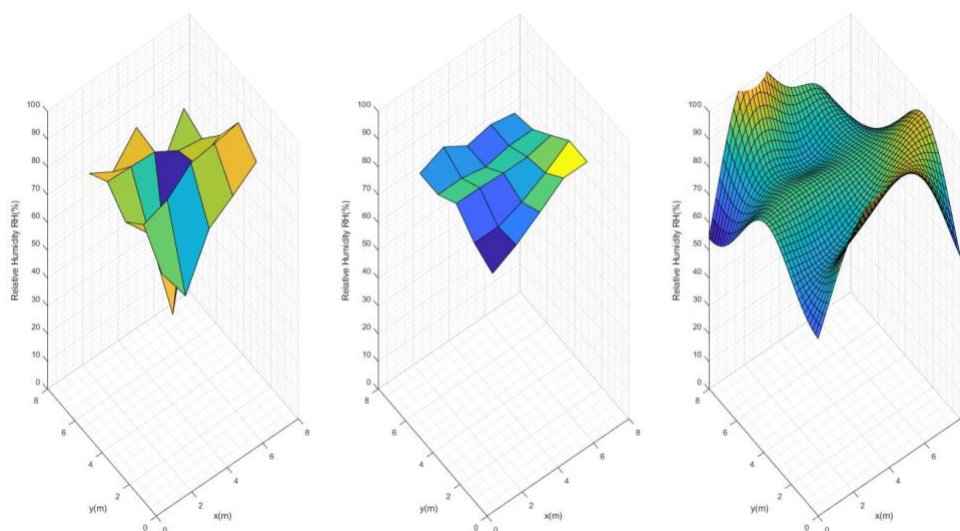


Imagen 20: Tramo 3 sector 1 después de la aplicación del riego (T3S1R)

Fuente autor

En esta sección del invernadero 3, se delimito otra cuadrícula de 5X5 en la cual se tomaron datos de manera diferente, antes y después de la aplicación del riego por aspersión en diferencia a las muestras tomadas cuando se aplicaba el riego por goteo, en este invernadero se tomaron solo

dos mediciones diarias en las horas determinadas por los agricultores, en estas graficas se puede observar que el comportamiento de estas es un poco diferente a los anteriores, esto se debe a que por medio del riego por aspersión el agua no penetra de una manera adecuada el suelo, por esta razón se pueden ver puntos atípicos en la representación gráfica, la imagen T3S5N es la representación de la humedad del suelo, antes de la aplicación del riego, en esta se puede observar un comportamiento uniforme, sobre todo en el mapa total de humedad del suelo del cultivo de tomate bajo invernadero.

En la imagen T3S5R, si se observan varios puntos atípicos y un comportamiento muy desordenado en su mapa total de humedad del suelo, esto se debe a que la aplicación del riego se hizo por el modelo de aspersión, lo que no permite claramente la penetración del agua en el suelo, ocasionando así que las plantas no reciban el agua necesaria para su desarrollo.

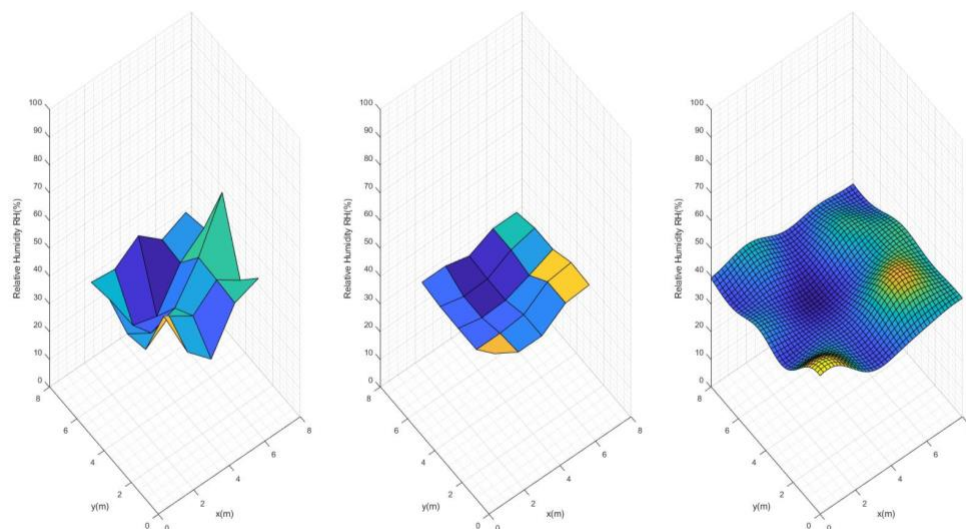


Imagen 21: Tramo 3 sector 5 antes de la aplicación del riego (T3S5N)

Fuente autor

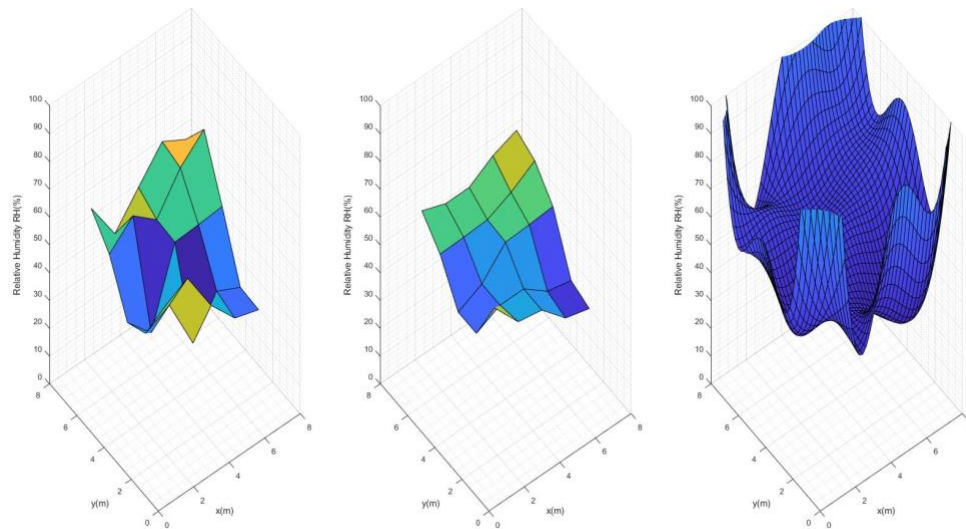


Imagen 22: Tramo 3 sector 5 después de la aplicación del riego (T3S5R)

Fuente autor

RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN Y BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico hace referencia a un conjunto de variables que entran y salen del procedimiento, generando que exista un balance en el área de influencia. En la agricultura la medición del balance hídrico se desarrolla de una forma similar a la manera más conocida, debido a que en este caso la entrada del agua no se genera por precipitación sino se genera por medio de la aplicación del riego en el cultivo, por otra parte la salida corresponde a la evapotranspiración debido a que el cultivo se encuentra bajo invernadero, también otras pérdidas se generan por los drenajes superficiales o el agua que eventualmente se profundiza mucho y queda fuera del alcance de la planta, formando así las aguas subterráneas.

Para este proyecto se realizó la medición del balance hídrico en los 3 invernaderos de estudio, en el cual se cuenta con la entrada del proceso, que es la aplicación del riego por goteo en cada uno de los invernaderos, por otra parte utilizando la fórmula de balance hídrico de thornthwaite se puede realizar el cálculo de la evapotranspiración que es la salida que se genera en el cultivo.

CALCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN INVERNADERO 1					
	TEMPERAT URA	INDICE DE EFICIENCIA	VALOR KC	ETP POTENCIAL	ETP MENSUAL
DIA 1	19	7,547313	0,45	8,262605	37,18172
DIA 2	16,6	6,151812	0,45	6,777427	30,49842
DIA 3	14,6	5,065118	0,45	5,613757	25,26190
DIA 4	16,3	5,98427	0,45	6,598564	29,69309
DIA 5	16	5,81831	0,45	6,421035	28,89466
DIA 6	10,3	2,98672	0,45	3,364577	15,1406
DIA 7	13,3	4,39815	0,45	4,895816	22,03117
DIA 8	12	3,763915	0,45	4,20997	18,94486
DIA 9	14	4,75332	0,45	5,278516	23,75332
DIA 10	18	6,95411	0,45	7,632425	34,345912
DIA 11	14,6	5,06511	0,45	5,613757	25,26191
DIA 12	11,6	3,57559	0,45	4,00567	18,02551

Tabla 7: ETP invernadero 1

En la tabla anterior se puede evidenciar los resultados de evapotranspiración en el invernadero número 1, el resultado promedio de evapotranspiración es 5,722835 mm, el índice de eficiencia de temperatura que se utilizo es de valor 62,063783 °C.

CALCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN INVERNADERO 2					
	TEMPERAT URA	INDICE DE EFICIENCIA	VALOR KC	ETP POTENCIAL	ETP MENSUAL
DIA 1	11,3	3,436530	0,75	3,917894	29,3844205
DIA 2	16,6	6,1518121	0,75	6,8391171	51,293378

DIA 3	17,6	6,721490	0,75	7,4438793	55,829095
DIA 4	13,3	4,3981577	0,75	4,9610059	37,207544
DIA 5	10,3	2,986723	0,75	3,425800	25,69350
DIA 6	14,3	4,90838	0,75	5,5103073	41,327304
DIA 7	15	5,27669	0,75	5,9052783	44,289587
DIA 8	15,3	5,4372868	0,75	6,0771222	45,578416
DIA 9	15	5,27669	0,75	5,9052783	44,289587
DIA 10	16,6	6,1518121	0,75	6,8391171	51,293378
DIA 11	13,6	4,549223	0,75	5,1239164	38,429373
DIA 12	15,6	5,5995104	0,75	6,2504842	46,878631

Tabla 8: ETP Invernadero 2

En la tabla que se observa en la parte superior se encuentran los cálculos de ETP del invernadero 2 en este se tuvo un Índice de temperatura de 60,894306 °C y un promedio de ETP de 5,6832667 mm.

CALCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN INVERNADERO 3					
	TEMPERAT URA	INDICE DE EFICIENCIA	VALOR KC	ETP POTENCIAL	ETP MENSUAL
DIA 1	16,5	6,0957915	0,80	6,821747	54,573976
DIA 2	16,5	6,0957915	0,80	6,821747	54,573976
DIA 3	12	3,7639151	0,80	4,3183635	34,546908
DIA 4	13,5	4,4986762	0,80	5,1140446	40,912356
DIA 5	11	3,2993466	0,80	3,8112023	30,48961
DIA 6	15,5	5,5452561	0,80	6,2360579	49,888463
DIA 7	14	4,7533223	0,80	5,3881797	43,105438

DIA 8	15,5	5,5452561	0,80	6,2360579	49,888463
DIA 9	13,5	4,4986762	0,80	5,1140446	40,912356
DIA 10	11,5	3,5290348	0,80	4,0623799	32,49904
DIA 11	16,5	6,0957915	0,80	6,821747	54,573976
DIA 12	17	6,3776265	0,80	7,1205059	56,964047

Tabla 9: ETP Invernadero 3

En la tabla anterior se encuentran los cálculos de ETP del invernadero número 3 en etapa de producción, este tuvo un Índice de temperatura de 60,098484 °C y un promedio de ETP de 5,6555064 mm.

8 CONCLUSIONES

Se puede concluir de acuerdo con los resultados de humedad del suelo obtenidos que el método de kriging utilizado y la ayuda de los sensores electrónicos para la toma de datos en campo son confiables y verídicos en la representación de los datos finales de humedad del suelo del cultivo de tomate bajo invernadero en la cuadrícula delimitada de 8x8.

En el invernadero número 1 se tomaron 3 muestras diarias en los horarios determinados por los agricultores, gracias a esto se puede concluir que para un invernadero que está en su etapa de crecimiento y desarrollo, es muy necesario la aplicación de los 3 riegos diarios, esto se pudo determinar debido a que en el intervalo de tiempo de cada aplicación del riego, se tomaron muestras las cuales reflejaron que el suelo mantiene un poco de humedad lo que no permite que las plantas sufran o se marchiten.

Gracias a las muestras desarrolladas en cada uno de los 3 invernaderos de tomate, donde las muestras se llevaron a cabo antes y después de la aplicación del riego, variando en que unos días se aplicó por medio del modelo de riego por goteo y otros días se aplicó por medio del modelo de aspersión, esto nos permitió concluir que el riego más adecuado y eficiente para los cultivos de tomate bajo invernadero es el riego por goteo, ya que este permite que el agua penetre de una mejor forma el suelo y logrando que las plantas se alimenten de la manera adecuada en su ciclo de vida.

El riego por aspersión no es el más adecuado para los cultivos de tomate bajo invernadero, debido a que este tipo de cultivos maneja una temperatura ambiente demasiado alta, ocasionando que el suelo se seque de una manera más rápida, ya que utilizando el modelo de riego por aspersión el agua no penetra de una manera adecuada el suelo, este tipo de riego solo moja el suelo en su parte superior y la planta no puede alimentarse de una manera adecuada debido a que este tipo de planta recibe o capta la mayoría de sus nutrientes por las raíces, de esta manera se puede concluir que el riego por aspersión no es recomendable para los cultivos de tomate bajo invernadero.

En el invernadero 3 se tomaron muestras de manera diferente debido a que en este cultivo, solo se estaba aplicando 2 riegos por día, esto debido a que este cultivo ya se encontraba en su etapa de producción, gracias a los datos tomados y las gráficas representadas en la sección de resultados se puede concluir que los agricultores realizan solo dos riegos diarios, para mantener en un punto medio la planta, ya que las plantas están terminado su ciclo de vida, distribuyendo de manera estratégica el intervalo de tiempo en cada aplicación de riego, desarrollando la aplicación de este en las horas en que el cultivo alcanza su temperatura más alta y de esta manera sostener hidratada la planta en este periodo de tiempo.

De acuerdo a las muestras tomadas en cada uno de los invernaderos se puede definir que la toma de 25 puntos por cuadrícula son suficientes para obtener una representación gráfica de humedad

del suelo confiable, ya que en las secciones donde se dividió la cuadrícula y se tomaron los datos de manera diferente, las gráficas representan comportamientos diferentes y se puede observar un mapa total de humedad del suelo muy disperso.

En este trabajo se puede definir que los sensores electrónicos son muy confiables en la toma de datos de humedad del suelo y que el método kriging es muy importante en la interpolación de datos, para poder obtener los gráficos o mapas totales de humedad del suelo.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguero Contreras, F. (2017). *Agricultura, historia y cultura. Análisis y reflexiones*.
file:///C:/Users/Oscar%20Leonardo%20P/Downloads/Agriculturahistoriaycultura.Analisis
yreflexiones.pdf
- ARCOS, R. M. S. (2018). *DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA AUTOMATIZADO CON ARDUINO PARA RIEGO EN EL CULTIVO DE FRESAS* [UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL].
<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/40625/1/TESIS%20SALINAS%20ARCOS%20RICARDO%20MIGUEL.pdf>
- Ayala, G. C., Valenzuela, A. D., Meza, H. C., Beltrán, A. R., Zavala, S. L., & Montenegro, M. R. (2014). Sistema de sensores inalámbricos para la implementación de espacios inteligentes. *Ra Ximhai*, 15-26. <https://doi.org/10.35197/rx.10.01.e.2014.02.gc>
- Castro, L. B. (2016). *SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO TIPO SONDA CON SISTEMA DE MONITOREO PARA APLICACIONES EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN*. 121.

- Castro, N. D., Chamorro, L. E., & Viteri, C. A. (2016). Una red de sensores inalámbricos para la automatización y control del riego localizado. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 106. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.57>
- CUZCO, J. C. V., & TENEMAZA, F. D. J. C. (2013). *Diseño e implementación de un sistema de riego automatizado y controlado de forma inalámbrica para una finca ubicada en el sector de balero estacio*. 144.
- Demin, P. E. (2014). *Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego*. 24.
- Díaz, S. E., Pérez, J. C., Mateos, A. C., Marinescu, M.-C., & Guerra, B. B. (2011). *A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks—ScienceDirect*. 252-265. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.02.004>.
- Enciso, J. M., Porter, D., & Périès, X. (2007). *Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego*. 14.
- FAO. (2002). *EL AGUA Y LA AGRICULTURA*. <https://www.fao.org/WorldFoodSummit/sideevents/papers/Y6899S.htm>
- Flores, W., Estrada, H., Jimenez, J., & Pinzon, L. (2012). *EFFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO SOBRE EL CRECIMIENTO Y EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA EN PLÁNTULAS DE TRES ESPECIES ARBÓREAS CADUCIFOLIAS*. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57325814006.pdf>
- García, O. Y. M., Quintero, D. C. R., & Mora, S. B. S. (2017). Sistema Inalámbrico Modular de Bajo Costo para Supervisar Variables Ambientales en Invernaderos: Un Respaldo al Agricultor de Pequeña Escala. *Revista Científica*, 29(2), 164-179. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.RC.2017.29.a5>

- GUIJARRO, A., Torres, L. J. C., PRECIADO, D. K., & Manzur, B. N. Z. (2018). *Sistema de riego automatizado con arduino*. 15.
- John, G. E. (2016). A low cost wireless sensor network for precision agriculture. *2016 Sixth International Symposium on Embedded Computing and System Design (ISED)*, 24-27.
<https://doi.org/10.1109/ISED.2016.7977048>
- Junguito, R., Perfetti, J. J., & Becerra, A. (2014). *DESARROLLO DE LA AGRICULTURA COLOMBIANA*. 82.
- Martínez Valdés, Y., & Villalejo García, V. M. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: Una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 58-72.
- Medina, A. (2018). CALIBRACIÓN DE SENSORES DE RESISTENCIA EN LA MEDICIÓN DEL POTENCIAL MÁTRICO EN TRES TIPOS DE SUELOS EN CONDICIONES DE INVERNADERO. *Agro Productividad*, 11(9), Article 9.
<https://doi.org/10.32854/agrop.v11i9.1226>
- Metas & Metrologos Asociados. (2008). *La-Guia-Metas. Sensores-de-Humedad*.
<http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-08-05-sensores-de-humedad.pdf>
- Moreno, L. P. (2009). *Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión*.
<http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v27n2/v27n2a06.pdf>
- Nissen, J., Quiroz, C., Seguel, O., Donald, R. M., & Ellies, A. (2005). VARIACION DEL POTENCIAL MATRICO DURANTE EL MOVIMIENTO DE AGUA EN ANDISOLES. *Agro Sur*, 33(1), 36-47. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2005.v33n1-05>
- ONU. (2008). *Recursos Hidricos Resumen del 2º Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo*. 6.

Pallas, R. A. (2008). *Sensores y Acondicionadores de Señal* (Cuarta).

Pdd2016-02-D-Productivo.pdf. (s. f.). Recuperado 31 de enero de 2022, de <https://www.boyaca.gov.co/images/planes/plan-de-desarrollo/pdd2016-02-D-Productivo.pdf>

Pereira, L. S. (2010). *EL RIEGO Y SUS TECNOLOGÍAS*. 296.

Perfetti del Corral, J. J., Balcázar, Á., & Hernández Gamarra, A. (Eds.). (2013). *Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia* (1. ed). Fedesarrollo. https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/61/LIB_2013_Pol%C3%ADticas%20para%20el%20desarrollo%20de%20la%20agricultura_Completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ramírez, L. G. C., Jiménez, G. S. A., & Carreño, J. M. (2014). *Sensores y Actuadores*. Grupo Editorial Patria.

Rendón, G. del C., Domínguez-López, J. Á., Martínez-Rodríguez, M. A., Garay-Molina, Ó. A., & Juárez-Pedraza, D. I. (2018). Sistema Inteligente para controlar sistemas de riego en México. *Ventana Informatica*, 37. <https://doi.org/10.30554/ventanainform.37.2721.2017>

Villarreal, D. Z., & GarcíaMarín, P. C. (2008). *El origen de la agricultura, la domesticación de plantas y el establecimiento de corredores biológico-culturales en Mesoamérica*. 30.

Villegas, Y. V., & Casadiego, Y. S. (2019). *Implementación de sensores en los sistemas de riego automatizado*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.3417>

Wendling, M. (2010). *SENSORES*. <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>

- Winpenny, J., Heinz, I., Koo-Oshima, S., Salgot, M., Collado, J., Hernández, F., Torricelli, R., Mateo-Sagasta, J., & Román, P. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?* 144.
- V. Sharma, M. Sharma, S. Pandita, J. Kour, and N. Sharma, “11 - application of geographic information system and remote sensing in heavy metal assessment,” in *Heavy Metals in the Environment*, V. Kumar, A. Sharma, and A. Cerdà, Eds. Elsevier, 2021, pp. 191–204. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128216569000110>
- M. Umer, L. Kulik, and E. Tanin, “Spatial interpolation in wireless sensor networks: localized algorithms for variogram modeling and kriging,” *Geoinformatica*, vol. 14, no. 1, pp. 101–134, 2010.
- J. Kang, R. Jin, and X. Li, “Regression kriging-based upscaling of soil moisture measurements from a wireless sensor network and multiresource remote sensing information over heterogeneous cropland,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 92–96, 2014.
- ArcMap. Cómo funciona kriging. Cómo funciona Kriging—Ayuda | ArcGIS for Desktop. [Online]. Available: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analysttoolbox/how-kriging-works.htm#>