



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Evaluación y análisis de un sistema de fertirriego para cebolla (*Allium cepa*) y papa (*Solanum tuberosum*), mediante el uso de diversas tecnologías de precisión agrícola en Tierra Blanca, Cartago

Trabajo Final de Graduación para optar por el grado académico de
Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

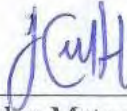
Jocelyn Matarrita Huertas

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

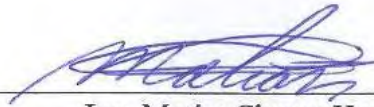
San José, Costa Rica

Febrero, 2024

Trabajo Final de Graduación bajo modalidad de práctica dirigida, sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas



Jocelyn Matarrila Huertas
Postulante



Ing. Matías Chaves Herrera, M.Sc
Director, Comité Asesor



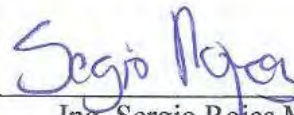
Ing. Juan Benavides Valverde, Dr
Comité Asesor



Ing. José Francisco Aguilar Pereira, M.Sc
Comité Asesor



Ing. Alejandra Rojas Gonzalez, Dra
Miembro, Tribunal Examinador



Ing. Sergio Rojas Montero M.Sc
Miembro, Tribunal Examinador

DEDICATORIA

A Dios por darme las fuerzas para continuar aun cuando creía todo perdido, por guiarme en este largo camino con la diestra de su justicia, recordándome cada día sus promesas mediante el amor de su Hijo Jesús y la presencia de su Santo Espíritu.

“Yo, Jehová, en el tiempo correcto haré que las cosas sucedan”

Isaías 60:22

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Carmen por sus oraciones que nunca me dejaron caer, a mi hermano José Daniel que me ha enseñado a nunca rendirme, a mi papá José que me apoyo en cada momento y sin su ayuda no hubiera logrado llegar hasta aquí. Juntos han sido el motor que me mueve cada día a ser mejor.

Al profesor Matías Chaves que siempre estuvo para ayudarme y apoyarme en cada etapa de este trabajo, a los profesores Juan Benavides y José Francisco Aguilar por sus consejos y apoyo.

A Don Santiago Vega por permitir el desarrollo de este trabajo en su parcela, mostrándome lo importante que es cada productor agrícola en Costa Rica.

A Alison y Gabriela, las amigas que la universidad me regalo, quienes me han apoyado en todo momento con sus consejos y no me dejaron perder la fe en mí misma.

A la Universidad de Costa Rica, que me brindo la oportunidad de estudiar esta bella carrera.

Y a todos aquellos que de alguna forma me apoyaron, gracias por sus consejos y oraciones que me ayudaron a culminar este trabajo con éxito.

RESUMEN

El presente trabajo se basó en la evaluación y análisis de un sistema de fertirriego en Tierra Blanca de Cartago, en el cual se evaluó la eficiencia del sistema mediante diversas tecnologías de precisión agrícola, como sensores y sistemas de información geográfica (SIG). En la parcela de estudio se cultivaba cebolla (*Allium cepa*) y papa (*Solanum tuberosum*).

Para llevar a cabo el análisis se determinaron tres etapas. La primera se basó en la caracterización de la parcela y del sistema de fertirriego implementado. Para esto, se realizaron diferentes muestreos de suelo, levantamientos topográficos y de infraestructura. A partir de lo anterior se encontró que la pendiente de la parcela, el tipo de equipo que se utiliza y las prácticas agrícolas son significativos en la aplicación del fertirriego.

La segunda etapa abarcó evaluar la distribución de riego y de nutrientes en las líneas de goteo. Para esto se recolectaron muestras del fertirriego en los diferentes lotes de riego de la parcela y se analizaron en campo mediante distintos sensores de pH, conductividad eléctrica y medición de caudal. Además, se implementó el uso de un ensamble de sensores Arduino diseñado específicamente para este caso. Junto con un tensiómetro, se evaluó la humedad, temperatura y tensión matricial en días con aplicación de riego y sin aplicación de riego.

Se obtuvo que existían diferencias significativas entre los lotes de riego en cuanto a caudal y conductividad eléctrica, confirmando los problemas en la uniformidad de aplicación del fertirriego. Asimismo, la humedad y la temperatura del suelo presentaron diferencias significativas entre los días de con aplicación de riego y sin aplicación de riego. Esto daba lugar a zonas diferenciadas dentro de esta parcela debido a la falta de homogeneidad de condiciones.

Finalmente, en la tercera etapa se buscó analizar y estudiar todos los aspectos que permitieran identificar el problema y así realizar las correspondientes recomendaciones. Estas sugerencias abarcaron desde modificaciones a la infraestructura, mejoras en los equipos de fertirriego, prácticas de conservación de suelos y aguas, actividades de mantenimiento y, por último, una propuesta tecnológica basada en el Internet de las cosas (IoT, en inglés). Las propuestas de mejora permiten que el productor pueda enfrentar los retos actuales, donde se busca optimizar el uso de recursos y energía.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Importancia.....	1
1.2 Delimitación del problema.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Objetivos.....	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Marco conceptual.....	5
2.1.1 Fertirriego.....	5
2.1.2 Coeficiente de uniformidad.....	7
2.1.3 Análisis de suelo.....	7
2.1.4 Sensores.....	8
2.2 Antecedentes.....	10
3. METODOLOGÍA	12
3.1 Descripción general.....	12
3.2 Caracterización de la parcela y del sistema de fertirriego.....	12
3.3 Evaluación de la eficiencia del sistema de fertirriego.....	15
3.3.1 Elaboración de sensores Arduino para medir humedad y temperatura del suelo....	15
3.3.2 Descripción de los métodos por utilizar en la evaluación de eficiencia del sistema de fertirriego.....	18
3.4 Identificación de los aspectos a mejorar y definición de las recomendaciones de la propuesta de mejora.....	24
3.4.1 Identificación de los aspectos a mejorar.....	24
3.4.2 Determinación de la propuesta de mejora.....	25
4. RESULTADOS	27
4.1 Caracterización de la parcela.....	27
4.1.1 Distribución física.....	27
4.1.2 Componentes del fertirriego.....	29
4.1.3 Características físicas y químicas del suelo.....	34
4.1.4 Evaluación de la lámina aplicada.....	36
4.2 Evaluación de la eficiencia del sistema de fertirriego.....	39
4.2.1 Análisis de la uniformidad del fertirriego.....	39
4.2.2 Evaluación de los efectos del riego en la parcela.....	45
4.3 Propuesta de mejora para la parcela de estudio y su sistema de fertirriego.....	54
4.3.1 Prácticas agrícolas y de conservación de suelos.....	55

4.3.1.1 Incorporación de materia orgánica.....	55
4.3.1.2 Rotación de cultivos y policultivo	56
4.3.1.2 Conservación de suelos y agua	57
4.3.1.3 Limpieza de goteros obstruidos	58
4.3.1.4 Aplicación de lámina de agua adecuada y efecto en el uso de recursos	58
4.3.2 Distribución de la parcela y de infraestructura	60
4.3.2.1 Tamaño de parcelas.....	60
4.3.2.2 Disposición del tubo principal y estandarización de las líneas de goteo	61
4.3.3 Equipo de fertirriego.....	62
4.3.3.1 Filtros	62
4.3.3.2 Mezcladores	63
4.3.3.3 Inyectores	64
4.3.4 Implementación de tecnología y sensores	65
5. CONCLUSIONES.....	71
6. RECOMENDACIONES	72
7. REFERENCIAS	73
8. APÉNDICES	78

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagramas de los sistemas de dosificación. a) Método de presión diferencial. b) Método Venturi. c) Bomba de inyección. Fuente: modificado de Villalobos y Fereres (2016)	6
Figura 2. Tanque de mezcla. Fuente: modificado de Liotta (2015).....	7
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología para el trabajo final de graduación	12
Figura 4. Puntos tomados en el levantamiento topográfico.....	13
Figura 5. Estación total TOPCON que se utiliza en el levantamiento topográfico. b) Prisma de la estación total.....	13
Figura 6. a) Cilindros que se utilizan para la recolección de muestras de conductividad eléctrica y densidad aparente. b) Recolección de muestras con barreno para textura y análisis químico del suelo	14
Figura 7. Configuración del ensamble diseñado para la toma de datos de humedad y temperatura	16
Figura 8. Secado del suelo en el horno	17
Figura 9. Preparación de los recipientes para la calibración del sensor de humedad.....	17
Figura 10. Curva de mejor ajuste para los valores que se obtienen en la calibración	18
Figura 11. Puntos de medición para el coeficiente de uniformidad, conductividad eléctrica y pH.....	19
Figura 12. Puntos de medición para el coeficiente de uniformidad, conductividad eléctrica y pH.....	20
Figura 13. a) Recolección de muestra del fertirriego. b) Medición del pH y conductividad de la muestra. c) Obtención del volumen de cada muestra.....	21
Figura 14. Puntos donde se ubicaron los sensores.....	22
Figura 15. Sitios de medición dentro de la parcela para la toma de datos de humedad, temperatura y tensión.....	23
Figura 16. Diagrama del geoprocésamiento aplicado al caso de estudio	24
Figura 17. Identificación de la parcela de estudio mediante imagen satelital	27
Figura 18. Distribución de la parcela.....	28
Figura 19. Elevaciones de la parcela de estudio	29
Figura 20. a) Cobertura plástica (mulch) de los lomillos. b) Mulch con los agujeros realizados. c) Segmento de la cinta de goteo usada en el sistema	30
Figura 21. Manómetro que se utiliza para gestionar la presión de trabajo	30
Figura 22. Diagrama del bombeo de agua desde el reservorio a los filtros.....	31
Figura 23. Batería de filtros y Venturi que se utiliza para la inyección del fertilizante	31

Figura 24. Sistema de bombas, válvulas y conectores que se utiliza del fertirriego de forma manual.....	32
Figura 25. a) Configuración para el llenado del tanque de mezcla. b) Configuración para la inyección del fertilizante a la tubería principal.....	32
Figura 26. a) Mezclado del fertilizante por parte del productor, b) nivel de manguera utilizado para la distribución del fertilizante en los lotes	33
Figura 27. Bomba que se utiliza para la inyección del fertilizante en la tubería principal.....	33
Figura 28. Válvulas de cierre de cada línea	34
Figura 29. Gráfico de cajas para el caudal.....	40
Figura 30. Gráfico de cajas para el pH	41
Figura 31. Gráfico de cajas para la conductividad eléctrica	42
Figura 32. Mapa del caudal de riego en la parcela	43
Figura 33. Fugas encontradas en las líneas de riego.....	44
Figura 34. Mapa de pH del riego en la parcela.....	44
Figura 35. Mapa de conductividad eléctrica en la parcela.....	45
Figura 36. Gráfico de cajas para el porcentaje de humedad	46
Figura 37. Mapa de humedad promedio con aplicación de riego.....	47
Figura 38. Mapa de humedad promedio sin aplicación de riego	47
Figura 39. Gráfico de cajas para la tensión matricial	49
Figura 40. Mapa de tensión promedio con aplicación de riego	50
Figura 41. Mapa de tensión promedio sin aplicación de	50
Figura 42. Evidencia de deslaves de terreno en la zona inferior de la parcela	51
Figura 43. Gráfico de cajas para la temperatura del suelo.....	52
Figura 44. Mapa de temperatura promedio sin aplicación de riego.....	53
Figura 45. Mapa de temperatura promedio sin aplicación de riego.....	53
Figura 46. Esquema de la propuesta de mejora	54
Figura 47. Ejemplo de coberturas con abonos verdes (IMN, 2020).....	57
Figura 48. Ejemplo de barrera viva para la parcela	57
Figura 49. a) Distribución actual de los lotes y b) distribución propuesta	61
Figura 50. Orientación de la tubería principal propuesta.....	62
Figura 51. Filtro de grava (YAMIT Filtration, 2021).....	63
Figura 52. Propuesta del tanque de mezcla.....	63
Figura 53. Mezclador recomendado para el sistema de mezcla	64
Figura 54. Dosificador volumétrico Dosatron (Dosatron, 2009).....	64

Figura 55. Mapa de zonas de interés para monitoreo	65
Figura 56. a) NetaCap: sonda de perfil, sensor multinivel de humedad y temperatura y b) Irrrometer RSU-V: tensiómetro (Netafim, 2020).....	66
Figura 57. Estación meteorológica Davis Vantage PRO2 (Netafim, 2020)	67
Figura 58. Recomendación de metodología para el uso de sensores en la parcela. Fuente: modificado de Netafim (2020).....	67
Figura 59. a) NetRTU: unidad terminal remota y b) NetMCU: unidad de control remoto (Netafim, 2020).....	68
Figura 60. Válvula solenoide conectada con unidad terminal remota. Fuente: modificado de Netafim (2020).....	68
Figura 61. a) Caudalímetro de RainBird (RainBird, 2023) y b) transmisor de presión inteligente de Keller (Keller, 2013)	69
Figura 62. Sistema modelo propuesto para la parcela de estudio	70

INDICE DE TABLAS

Tabla I. Resultados de los análisis químicos del suelo, un mes antes de la cosecha y 15 días después de la cosecha en los laboratorios del CIA en la UCR.	35
Tabla II. Láminas aplicadas actualmente por el productor.....	36
Tabla III. Láminas de riego diarias según la ET_C correspondiente.	37
Tabla IV. Láminas de riego según las características del suelo y cultivo.	38
Tabla V. Resultados del coeficiente de uniformidad en los lotes de riego.	39
Tabla VI. Tabla de resumen estadístico del caudal en cada lote.	39
Tabla VII. Tabla de resumen estadístico del pH en cada lote.	41
Tabla VIII. Tabla de resumen estadístico de la conductividad en cada lote	42
Tabla IX. Tabla de resumen estadístico del porcentaje de humedad de los 4 sensores en cada punto de medición clasificados en la metodología.	45
Tabla X. Tabla de resumen estadístico de la tensión en cada punto de medición.	48
Tabla XI. Tabla de resumen estadístico de la temperatura en cada punto de medición.	51
Tabla XII. Láminas propuestas y tiempos de riego.	59
Tabla XIII. Porcentaje de reducción de aplicación de agua.	59
Tabla XIV. Consumo mensual de la bomba según el cronograma.....	60

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia

En la actualidad, la demanda de alimentos ha provocado un aumento de las actividades agrícolas en el ámbito mundial. Esto lleva a los productores a implementar en mayor medida el uso de diferentes recursos y métodos para mejorar la producción. Debido a lo anterior, el uso del suelo, agua y agroquímicos aumentó a través de los años. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2018), las tierras dedicadas a la agricultura son responsables del 69 % de la extracción de agua en el mundo, lo que provoca que estas zonas experimenten de forma intensa la creciente escasez de agua en virtud de su gran dependencia de este recurso en sus actividades.

Dentro de las prácticas para la producción agrícola está el fertirriego, en el cual se aplican nutrientes junto con el agua de riego. Frecuentemente, se usa en el riego por goteo, aunque se puede adaptar a diferentes métodos (Villalobos y Fereres, 2016). Sin embargo, la mayoría de los agricultores no monitorean ni planifican de forma adecuada la cantidad de fertilizante aplicado junto con el riego. Se estima que el 80 % del nitrógeno aplicado en el proceso, componente principal de los fertilizantes, se pierde en el ambiente alterando los ecosistemas (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2020a). Esta pérdida se debe a que las plantas llegan a absorber entre el 30 % y 50 % de los fertilizantes químicos, el resto se pierde en el suelo, lo que altera sus características y disminuye su capacidad productiva (Gonzales, 2019).

Para el periodo del 2014 al 2015, el consumo de fertilizantes en el ámbito mundial fue cercano a 181 900 000 t. Esto corresponde a un aproximado de 102 500 000 t de nitrógeno y menos de 80 000 000 t de otros componentes como fósforo y potasio. En Costa Rica, el 82 % de las fincas utilizó fertilizantes en el 2014. Se estima que en el 2016 se utilizaron 8897 t de plaguicidas, tanto importados como formulados en el país. Además, se estima que en el país se aplican cerca de 51,2 kg de agroquímicos por hectárea, lo cual coloca a la nación entre los países que más consumen agroquímicos (FAO, 2011).

Costa Rica es un país donde la actividad agrícola es parte fundamental de la economía. En la actualidad no solo produce para exportación, sino también para la demanda nacional de diversos productos que son de consumo diario en las familias costarricenses.

Dentro de los productos con una gran demanda nacional está la cebolla (*Allium cepa*). La misma ocupa uno de los primeros lugares entre las hortalizas de mayor consumo en el ámbito nacional (Serrano, 2007).

Para el 2019, se estimó que el área sembrada de cebolla en el país fue de 1305,7 ha, con una producción de 27 783,1 t, siendo el 95.5 % destinado para venta. Además, el 58.6 % de las fincas utilizaban riego por aspersión y el 96.7 % usaban fertilizantes químicos.

En cuanto a la papa (*Solanum tuberosum*), se estimó que en el 2019 el área cultivada fue de 3298,7 ha, con una producción de 52 824,3 t. El 26.4 % de las fincas utilizaron riego en sus cultivos (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2020).

Además, es importante destacar que el uso de nuevas tecnologías y la implementación de las tendencias del IoT (Internet de las cosas, en español) en la agricultura responden a la necesidad de satisfacer la demanda creciente de alimentos en el mundo. La puesta en funcionamiento de sensores permite al agricultor realizar un mejor monitoreo y registro de su producción, lo cual implica el aumento del rendimiento de esta. Se estima que el 21 % de los clientes de empresas de tecnologías 4.0 en el país son del sector agrícola. Esto último resalta el creciente interés por innovar, debido a que cada día se necesitan nuevas herramientas para responder a las necesidades del mercado y sus grandes cambios (Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica [Procomer], 2021).

1.2 Delimitación del problema

Diferentes proyectos en el área agrícola desarrollados por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) han buscado minimizar la cantidad de fertilizantes usados y optimizar los recursos como el suelo y el agua. Se busca obtener la mayor producción por lote para mejorar aspectos económicos en la comunidad productora. Una de las herramientas que se utiliza son los sensores que permiten definir de forma precisa la cantidad de agua y fertilizantes que un cultivo necesita (Chinchilla, 2018).

Mediante el proyecto Agrinnovación 4.0 del MAG, los pequeños productores de Tierra Blanca han logrado un incremento del 120 % en producción y una reducción del 52 % en costos. Esto resalta los beneficios de automatizar procesos e implementar agricultura de precisión. En conjunto, ambas pueden disminuir drásticamente el uso de recursos hídricos y fertilizantes en Costa Rica (Presidencia de la República de Costa Rica, 2020).

Debido a la importancia actual de disminuir el uso excesivo de fertilizantes y agua, un problema común en muchas fincas del país, se busca analizar el sistema de fertirriego de una parcela de cebolla (*Allium cepa*) y papa (*Solanum tuberosum*) en Tierra Blanca, Cartago. Se busca aprovechar una temporada del cultivo de aproximadamente 6 meses, tiempo en el cual se caracteriza y evalúa el sistema actual de fertirriego, con el fin de que se determine cuáles son los problemas más recurrentes y sus causas. Según el productor, en virtud del relieve del lugar se presentan inconvenientes en la distribución de riego, lo que afecta la productividad de la finca en ciertas zonas de manera significativa.

Ante la necesidad de adaptarse a los cambios climáticos y aumentar la producción de manera sostenible, se debe analizar el sistema de fertirriego de ambas parcelas. Es necesario evaluar la eficiencia y eficacia de este mediante la recolección de datos a través de sensores e inspecciones presenciales. Finalmente, se busca brindar las recomendaciones adecuadas para optimizar la producción de cebolla y papa. Esto no solo pretende dar una solución a un agricultor, sino también proveer un ejemplo para los demás productores de la zona.

1.3 Justificación

El mal manejo de la aplicación del fertirriego ocurre en diferentes fincas agrícolas, ya que extraer, desviar, aplicar y drenar agua de manera continua, trae consecuencias ambientales. Este panorama empeora si se agrega el uso excesivo de agroquímicos, los cuales llegan a dañar de forma permanente diversos recursos hídricos. Esto no solo tiene connotaciones económicas o ambientales, sino también sobre la salud humana. Día tras día, aumentan los casos de intoxicación por químicos que se utilizan durante la producción de alimentos, a pesar de los esfuerzos que actualmente se hacen con diversas políticas que limitan el uso de sustancias tóxicas (FAO, 2018).

Además, se debe considerar que Costa Rica ha presentado en los últimos años un aumento del 186 % en el precio de los fertilizantes, lo cual hace que su implementación en las actividades agrícolas sea cada vez más costosa. Muchos agricultores no pueden costear la cantidad de fertilizantes aplicada tradicionalmente, lo que los lleva a disminuir su uso y ocasiona una menor producción de la que se espera (Pomareda, 2022).

Por lo tanto, es de vital importancia para la sociedad pasar de una agricultura convencional a una forma más sostenible de cultivar alimentos. A pesar de ser un aspecto urgente, esta transición se considera muy difícil, aún más para aquellos que ven pocos recursos entre sus posibilidades para cambiar lo que han hecho durante años. Además, los fertilizantes sintéticos ya están vinculados a la cadena productiva mundial y forman parte importante del mercado agrícola (ONU, 2020b).

Para esto, se busca realizar los ajustes necesarios en la agricultura tradicional, junto con la agricultura de precisión y buenas prácticas agrícolas. La automatización de procesos, como el fertirriego, lograría que los cultivos sean más eficientes y, a la vez, mejoraría aspectos como el valor nutricional y la disminución de enfermedades y plagas en cada temporada (Chinchilla, 2018). Con este proyecto, se busca marcar una pauta para otros productores con condiciones similares, lo que demuestra que es posible lograr un cambio positivo que no solo beneficiará al productor, sino también al entorno que lo rodea.

Dentro de este margen se pueden contemplar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la ONU. Los ODS buscan lograr metas globales donde cada persona tiene la oportunidad de llevarlas a cabo desde sus comunidades. Esto es de vital importancia para el proyecto, ya que los ODS, como producción y consumo responsables, hambre cero y acción por clima, se contemplan dentro de la agricultura sostenible. Estos ODS pretenden aumentar la productividad agrícola e ingresos de pequeños productores, logrando, a la vez, una gestión sostenible con el uso eficiente de los recursos naturales (ONU, 2020b).

1.4 Objetivos

- Objetivo general

Evaluar y analizar el sistema de fertirriego que abastece una parcela de cebolla (*Allium cepa*) y papa (*Solanum tuberosum*), con el fin de realizar recomendaciones para optimizar el rendimiento y uso de recursos mediante la implementación de sensores en la zona de Tierra Blanca, Cartago.

- Objetivos específicos
 1. Caracterizar la parcela de estudio y el sistema de fertirriego actual en Tierra Blanca, Cartago, con el fin de reconocer los diferentes aspectos que conforman el sistema mediante visitas de campo.
 2. Evaluar la eficiencia del fertirriego en cuanto a su aplicación en la parcela de estudio mediante el coeficiente de uniformidad, datos de sensores de humedad, temperatura, tensión matricial, acidez (pH) y conductividad eléctrica.
 3. Proponer una mejora al actual sistema de fertirriego mediante el uso de sensores y dispositivos electrónicos para optimizar la producción y uso de recursos como el agua, fertilizantes y energía.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Marco conceptual

En el análisis de un sistema de fertirriego se destacan múltiples conceptos que es necesario definir para comprender la presente investigación. Entre los conceptos que se destacan, se encuentran los componentes básicos del fertirriego, los métodos de evaluación de eficiencia de este, así como los diferentes tipos de sensores que se pueden utilizar y los medios que existen para crearlos. Además, se mencionan las características generales de los cultivos que interactúan con todo lo anterior. Todos estos aspectos se relacionan entre sí y se detallan a continuación.

2.1.1 Fertirriego

El fertirriego es la aplicación simultánea de agua y nutrientes, mediante la conexión del sistema de dosificación de nutrientes con el sistema de riego. Se considera que esta práctica puede utilizarse en todos los tipos de riego, pero su uso más común es en el riego por goteo debido a su alta precisión. Existen dos clases de fertirriego según su dosificación: el proporcional y el cuantitativo. El proporcional consiste en aplicar una cantidad constante de nutrientes proporcional al flujo de riego, mientras que el cuantitativo aplica diferentes concentraciones de nutrientes que varían con el tiempo (Villalobos y Fereres, 2016).

Los nutrientes necesarios para el cultivo los proporciona el fertilizante, el cual puede encontrarse en presentaciones líquidas o granuladas. Las propiedades más importantes de los fertilizantes son la concentración de nutrientes, solubilidad, pureza, pH y compatibilidad con el cultivo y el suelo. Es muy importante conocer estos aspectos, ya que el rendimiento del cultivo también depende de ellos. Lo ideal es aplicar cantidades que no excedan los niveles de conductividad deseados y mantener el pH dentro del rango de 5,0-6,5, pues a estos niveles los nutrientes son mejor absorbidos por las raíces (Villalobos y Fereres, 2016).

Para la implementación del fertirriego, el fertilizante debe ser soluble en agua, por ejemplo, se puede utilizar el nitrato de amonio, el cloruro de potasio, el nitrato de potasio, la urea, entre otros. Las soluciones madres se pueden preparar mezclando los fertilizantes simples para obtener diferentes concentraciones de N:P:K (nitrógeno, fósforo y potasio). Es importante controlar la temperatura de la solución madre, ya que la solubilidad de los fertilizantes aumenta con la temperatura y algunos suelen tener reacciones endotérmicas y exotérmicas (Calvache, 2015).

Otro aspecto importante sobre los fertilizantes es la compatibilidad entre ellos y el agua de riego, en especial con aguas duras o alcalinas. La interacción incorrecta de estos elementos puede causar obstrucciones en la cinta de riego debido a la precipitación de sales, lo cual evita la distribución homogénea de los nutrientes. Una forma de evitar estos problemas es utilizar periódicamente ácido en el sistema para eliminar la acumulación de sedimentos (Calvache, 2015).

La inyección del fertilizante en el sistema de riego se puede realizar mediante diferentes equipos y métodos. El objetivo es que se aplique de forma uniforme de acuerdo con la necesidad del cultivo. Su funcionamiento básico se basa en tomar una solución madre del fertilizante concentrado por medio de inyectores y agregarlo al flujo de riego. Las proporciones de esta mezcla varían, pero comúnmente la mezcla madre es de 25 a 200 veces más concentrada que la solución final que reciben las plantas. Además, se debe tener en cuenta que la concentración de fertilizante en el riego puede verse afectada por la presión del agua, el equipo y la velocidad del flujo (Dumroese *et al.*, 2012).

Dentro de los equipos usados para la inyección del fertilizante se encuentra la válvula reguladora de presión, como se observa en la Figura 1(a). La válvula se coloca en la entrada y salida del tanque de la solución madre. La diferencia de presión hace que el agua fluya hacia el tanque, lo que lleva los nutrientes a la línea de riego.

Luego, se tiene el sistema Venturi en la Figura 1(b), el cual utiliza un dispositivo Venturi paralelo a la tubería principal. Aunque también se puede dar en diferentes configuraciones, en este caso el dispositivo provoca una succión debido a su estrechamiento. Este método permite que la dosificación sea proporcional al flujo de riego y la dosificación depende más del sistema de riego y su capacidad.

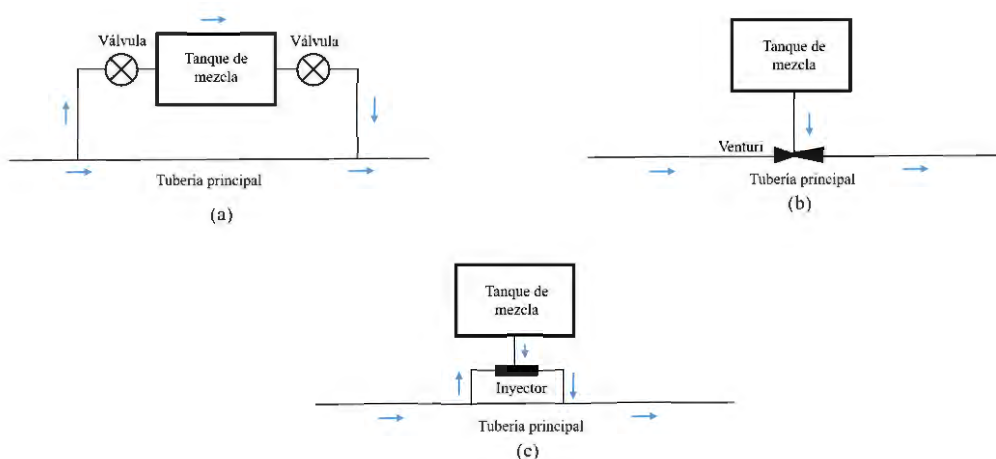


Figura 1. Diagramas de los sistemas de dosificación. a) Método de presión diferencial. b) Método Venturi. c) Bomba de inyección. Fuente: modificado de Villalobos y Fereres (2016)

En cuanto al resto de los equipos que se utilizan en el fertirriego, estos pueden ser muy complejos según el nivel de automatización que se aplique o más simples si muchos de los procesos se realizan de forma manual. Los sistemas más automatizados tienen lo que se denomina un cabezal de riego, donde se gestiona el fertirriego mediante tanques de fertilización, filtros, válvulas y tableros eléctricos (Prakor, 2019). Dentro de los sistemas más sencillos de fertirriego, su componente principal es un tanque de mezcla en el cual se encuentra la solución madre, como se muestra en la Figura 2.

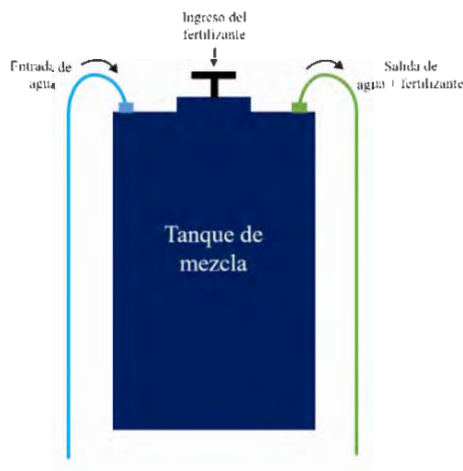


Figura 2. Tanque de mezcla. Fuente: modificado de Liotta (2015).

2.1.2 Coeficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad representa cuán homogéneo es el riego sobre el área del cultivo. Este valor es muy importante en el momento de evaluar el sistema de riego, ya que también refleja cómo se distribuye la lámina de agua y las pérdidas que se producen en este. Al final, lo que busca es identificar las zonas que presentan deficiencias, estas sean de exceso de riego o falta de este. Una mala distribución del agua de riego se manifiesta en pérdidas de nutrientes, aumento de energía, disminución en rendimientos y bajos precios de productos (Oliveira *et al.*, 2018).

El coeficiente de uniformidad (CU) se refleja de manera porcentual. Un valor de 100 % muestra que el riego fue homogéneo en toda el área del cultivo, lo cual no es común en la vida real. La fórmula la desarrolló Jerald Christiansen en 1942 y fue modificada posteriormente por David Karmely y Jack Keller en 1974. Esta fórmula se basa en el análisis del cuartil con menor caudal y el caudal promedio de todas las muestras (Bedoya *et al.*, 2018).

$$CU = \frac{q_{25}}{q_{media}} * 100 \quad (1).$$

q_{25} = Caudal promedio de los goteros que conforman el 25 % que emiten menor caudal (l/h).

q_{media} = Caudal promedio de todos los goteros medidos en el análisis (l/h).

2.1.3 Análisis de suelo

Los análisis de suelo son una herramienta muy importante en el momento de realizar diagnósticos sobre problemas de fertilización. En su mayoría suelen ser rápidos y poco costosos, lo cual los hace siempre una buena opción para conocer los niveles nutricionales del suelo y sus necesidades. Estos análisis también se usan para monitorear los efectos de los fertilizantes en el suelo, mediante los cuales se obtienen datos como la carga iónica, mineralogía de arcillas, capacidad de intercambio catiónico, pH, entre otros. El muestreo debe ser representativo de toda el área de estudio, por lo tanto, la muestra por analizar debe contener

submuestras pequeñas de diferentes áreas, con el fin de representar de la mejor forma la zona de interés (Molina, 2011).

Con datos de características físicas del suelo como su textura, específicamente el porcentaje que posee de arcilla, limo y arena, se puede obtener la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) del suelo mediante la fórmula de Peele (2) y la fórmula de Briggs (3) respectivamente (Calvo, 2005).

$$CC = 0,480(\% \text{ arcilla}) + 0,162(\% \text{ limo}) + 0,023(\% \text{ arena}) + 2,62 \quad (2).$$

$$PMP = 0,302(\% \text{ arcilla}) + 0,102(\% \text{ limo}) + 0,0147(\% \text{ arena}) \quad (3).$$

2.1.4 Sensores

Los sensores son aquellos que captan información importante del ambiente, como la temperatura, humedad, radiación, conductividad, entre otros. A la vez, los datos pueden almacenarse de forma remota o tomados de manera directa en campo. Dentro del tipo de sensores que existen en la agroindustria están los de precisión, los cuales captan información directa del cultivo, ya que se colocan en el suelo o planta. La información recolectada brinda más detalle de la zona que se quiere controlar (Fernández, 2015).

Uno de los aspectos más importantes en el momento de monitorear cultivos es la humedad. En este caso hay gran variedad de sensores, pero los más usados son los de contenido volumétrico de agua en el suelo y los tensiómetros. Este último mide el esfuerzo que hace la raíz del cultivo para obtener agua, reportando la presión de succión ejercida por las plantas. Con esto se puede determinar en cuáles secciones del cultivo las plantas hacen un mayor esfuerzo por conseguir agua debido a la falta de humedad. Los de contenido volumétrico miden el agua en porcentaje por volumen de suelo y brindan la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) (Prismab, 2019).

Además, son muy útiles los sensores de conductividad, los cuales brindan información sobre los niveles de nutrientes disueltos en agua y suelo, muchas veces van acoplados a los de contenido volumétrico. A la vez, existe la opción de medir este dato con multímetros. La medición de la conductividad en el suelo guía al agricultor sobre el comportamiento de las sales en las raíces de la planta, asimismo, indica si se necesita un lavado de suelo o no. Otro parámetro importante de medir es la temperatura, ya sea del ambiente o del suelo, ya que es de gran ayuda para determinar la evapotranspiración de la planta y de la actividad productiva de esta (Prismab, 2019).

Para los anteriores sensores que sean digitales, pueden ser programados para realizar mediciones varias veces al día o en horarios estratégicos como antes y después del riego, días donde hay aplicación de riego y días donde no se aplica. De esta forma, permite comparar los datos por épocas y entre los diferentes estadios fenológicos de la planta. La información recaudada puede almacenarse en un *data logger* para luego ser recolectada o directamente

hacia un almacenamiento en nube, lo cual requiere mayor equipamiento de red, la principal ventaja de este último es observar los datos en tiempo real (Prismab, 2019).

En cuanto a los colectores de datos, estos son pequeños grabadores de datos que registran en tiempo real, pueden medir y almacenar información durante días o años, para luego descargarlos a una computadora para su respectivo análisis. La capacidad que posean para guardar datos depende del modelo y del tipo de mediciones que se deseen realizar. Si bien algunos *data logger* utilizan Ethernet para enviar los datos a una plataforma para su monitoreo, es muy común que se opte por aquellos que muestran mediciones en tiempo real mediante una pantalla. Esto permite al productor llevar a cabo una evaluación en aspectos como el fertirriego para tomar decisiones inmediatas y después se realiza un análisis posterior descargando todos los datos medidos (Smith, 2020).

En la gran gama de sensores que existen, están los dispositivos de Arduino, la cual es una plataforma de diferentes prototipos electrónicos que procesan la entrada y salida de distintos datos. Además, forman parte del concepto de *hardware* y *software* libre, con el objetivo de proveer herramientas fáciles de programar y accesibles para todos. Al ser un *software* libre, cualquiera de sus programas puede ser copiado y modificado, ya que son de dominio público. Estos funcionan con un microcontrolador (MCU), el cual es un ordenador que posee procesador, memoria y terminales de entrada y salida. Los MCU se instalan dentro de los Arduinos para controlar sus acciones y se programan en C/C++ (Caicedo, 2017).

2.1.5 Cebolla (*Allium cepa*) y papa (*Solanum tuberosum*)

La cebolla (*Allium cepa*) pertenece a la familia *Amayllidaceae* y forma parte de las 500 especies del género *Allium*. Su producción está ubicada en diferentes zonas geográficas del país, en la zona alta principalmente, que abarca Tierra Blanca, Llano Grande, Potrero Cerrado y Cot, también está presente en la zona media y zona baja. La época de siembra y cosecha está determinada por la época de lluvias y ventanas de mejor precio. La temporada de siembra más importante va desde la última semana de abril hasta la primera semana de junio. La cosecha, desde finales de agosto hasta principios de octubre (Serrano, 2007).

La papa pertenece a la familia *Solanácea*, proveniente de los Andes sudamericanos. En el país existen 19 variedades comerciales, las principales en el mercado son la Floresta, Granola, Idiafrit y Única. Se cultiva todos los meses del año, pero presenta un pico entre los meses de mayo-junio y octubre-noviembre, mientras que su ciclo productivo es de aproximadamente 123 días. Al igual que la cebolla, su producción se centra en Cartago, en lugares como Tierra Blanca, Potrero Cerrado y Cot (Vignola *et al.*, 2017).

Uno de los aspectos importantes en cada uno de estos cultivos es el coeficiente del cultivo (Kc), el cual indica los cambios en la vegetación y en la cobertura del suelo. Este valor cambia a lo largo de las etapas del cultivo: etapa inicial, etapa de mediados de temporada y etapa final. Para la cebolla el Kc inicial es de 0,7, el medio 1,05 y el final 0,75; para la papa el Kc inicial es de 0,5, medio 1,15 y 0,75 el final. Estos valores muestran que su mayor valor se encuentra en las fases iniciales de ambos cultivos, indicando mayor demanda de nutrientes y recursos en

esa etapa, lo cual es de vital importancia conocer cuando se diseña riego a precisión (FAO, 2006).

2.2 Antecedentes

Es importante destacar que la incursión de tecnologías de precisión en la agricultura se ha presentado desde décadas atrás, todo esto como respuesta a la creciente demanda de alimentos y demás factores socioambientales que intervienen en el proceso. Por ende, existen múltiples investigaciones que demuestran los beneficios de la implementación de diversas tecnologías en esta área, por tanto, se considera de relevancia evaluar sus resultados para obtener una mayor visión del quehacer de la tecnología en este ámbito.

En un reciente estudio sobre la optimización del uso de nutrientes y agua en fertirriego, se implementó un sistema automatizado por tensiómetros. Se ubicaron tres tensiómetros equidistantes entre sí, uno de ellos escogido para activar el sistema de riego de forma automática. Se evaluaron cultivos de zapallo y chile dulce donde cada uno fue sometido a tres tratamientos de fertirrigación, donde el sistema se activaba por diferentes presiones de succión (tensión matricial) reportadas por los tensiómetros. En el caso del zapallo se obtuvo que cuanto menor fuera la presión de succión que activara el sistema, mayor era la producción, pero, a la vez, era la que presentaba mayor consumo de agua y nutrientes. Aquellas que tenían como señal una tensión mayor producían menos, esto se debe a que la planta tenía menos agua disponible (Contreras *et al.*, 2018).

Los autores, al considerar factores ambientales y productivos, obtuvieron como resultado que mantener una tensión intermedia era lo ideal. Al evaluar el caso del chile dulce se evidenció que al pasar de -10 kPa a -20 kPa las plantas recibieron 20 % menos de agua que el primer caso y para -30 kPa un 40 % menos de agua. Esto resalta la importancia de monitorear las condiciones del suelo como humedad o tensión matricial, con el fin de brindar los recursos necesarios a los cultivos, pero, a la vez, manteniendo un equilibrio entre la producción y el ambiente (Contreras *et al.*, 2018).

En otro caso de estudio realizado por Gómez y Jiménez (2019) en un cultivo gulupa en Colombia, se diseñó y validó un sistema de fertirrigación automático, con el fin de optimizar su producción probando de forma independiente los sistemas construidos. El sistema poseía un sistema electrónico y de control con sensores de humedad y temperatura, para esto, se implementó una programación con Arduino. Los datos obtenidos se almacenaron en una aplicación local web, que también permitía al productor registrar los kilogramos producidos.

Al final del estudio se obtuvo que, desde el primer mes registrado, después de la instalación, el sistema de fertirriego tuvo un 41 % de aumento en la producción de gulupa tipo exportación. Esto demuestra cómo un sistema tradicional puede mejorar su producción con el sistema de fertirriego adecuado junto con un monitoreo de las condiciones del suelo, además de mitigar enfermedades y pérdidas en el cultivo, de igual forma como se demostró en el primer caso ya mencionado

Y con respecto al uso de sensores más económicos con *hardware* y *software* Arduino, una investigación realizada por Gaikwad *et al.* (2021) en sectores agrícolas de Maharashtra, India, demostró que la eficiencia de estos sensores es alta en comparación con los comerciales con respecto a la precisión y precio. El estudio se basaba en el desarrollo de un *kit* de Arduino con sensores para monitorear temperatura y humedad del suelo y aire. A esto se le añadió una aplicación para *Smartphone* con un servidor en la nube. Se validaron los sensores creados en cultivos de maní y trigo, en diferentes condiciones, cuyas mediciones se almacenaban en la nube junto con las coordenadas GPS del lugar.

En Gaikwad *et al.*, 2021, se compararon con una estación climática para los datos del aire y sensores comerciales para los datos de suelo. Al final se obtuvo que en la temperatura y humedad el error cuadrático medio fue de $\pm 1,06$ °C y $\pm 3,97$ % respectivamente y en el caso del aire $\pm 2,14$ % y $\pm 0,7$ °C. Estos resultados al compararse con otros sistemas más costosos se hallan superiores, más económicos y adaptables a diversas condiciones. El *kit* diseñado en este estudio se estimó en un valor menor que \$100, mientras que adquirir solamente el sensor de temperatura de suelo costaba alrededor de \$40. Por esta razón, es importante el desarrollo de estas tecnologías, ya que muchos productores no suelen tener grandes presupuestos para adquirir sistemas como estos (Gaikwad *et al.*, 2021). Ante los mencionados casos de éxito, queda claro cómo el uso de sensores puede beneficiar la producción de un cultivo y mejorar el manejo de recursos, como lo es el uso de agua y fertilizantes, ya se posee mayor precisión en su aplicación. Así como a su vez integrar equipos un poco más experimentales como los sensores Arduino, que logran ser una herramienta accesible con excelentes resultados tanto para un productor o un profesional en el área. Además, que la importancia de implementar estas metodologías son las decisiones que se pueden tomar con los datos obtenidos, lo cual siempre será el propósito de la agricultura de precisión, tomar decisiones acertadas en los momentos apropiados.

3. METODOLOGÍA

3.1 Descripción general

Este estudio se dividió en tres etapas, cada una correspondiente a uno de los objetivos específicos, como se puede ver en la Figura 3 que juntos permiten la evaluación y análisis del sistema de fertirriego de papa y cebolla. La primera fue la caracterización de la parcela y de su sistema de fertirriego mediante diferentes pruebas y visitas de campo. La segunda, la evaluación de la distribución de riego y de nutrientes, con la ayuda de distintos sensores y el cálculo del coeficiente de uniformidad, identificando las zonas de interés o posibles problemas que presente el sistema. Y finalmente, en la última etapa se identificarán los aspectos a mejorar en base a los datos recolectados del sistema de fertirriego, además de realizar las recomendaciones pertinentes que formarán parte de la propuesta de mejora.

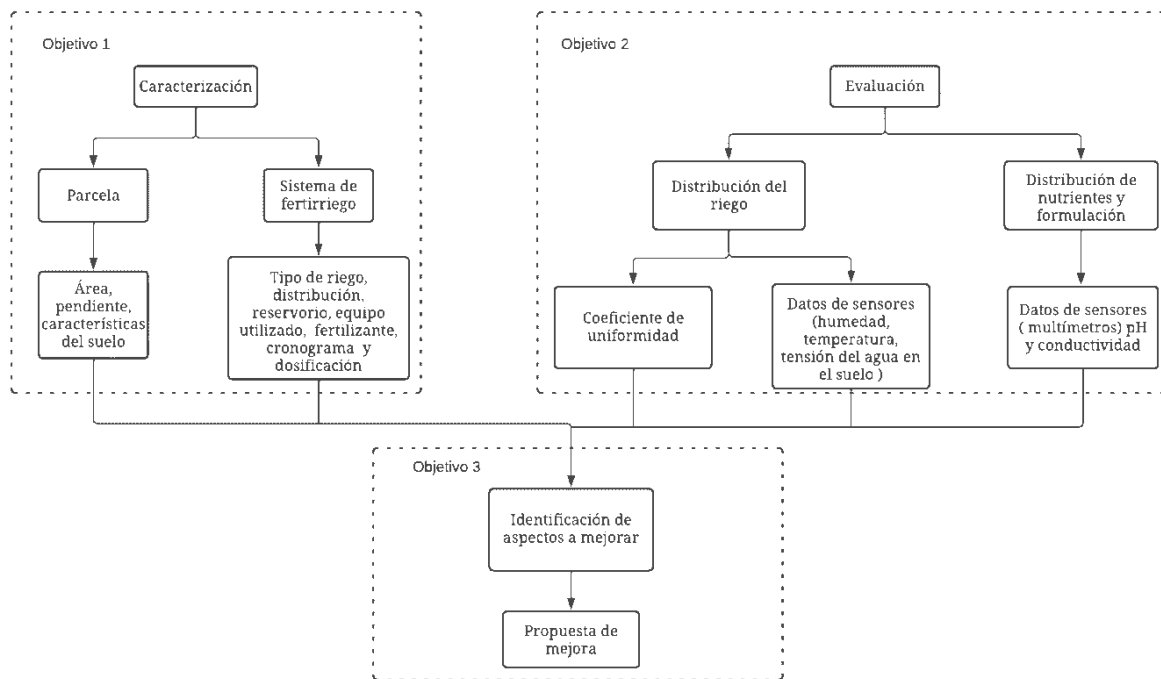


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología para el trabajo final de graduación

3.2 Caracterización de la parcela y del sistema de fertirriego

La parcela se caracterizó mediante seis visitas de campo desde enero de 2023 hasta julio de 2023. En la primera visita en enero, se llevó a cabo un levantamiento topográfico del área, tomando 109 puntos a lo largo del lote, como se muestra en la Figura 4. Estos puntos se procesaron en un MDE (modelo digital de elevaciones). Para la toma de los puntos, se utilizó una estación total de marca TOPCON modelo GTS-236 W, como se presenta en la Figura 5.

Con este levantamiento, también se delimitó el área de la parcela y se comparó con el catastro de la finca. Además, se determinó su área cultivable y se analizó la distribución actual de los cultivos. Asimismo, se ubicaron los lomillos y se estudió la distribución espacial del sistema en general, para realizar un plano más detallado de la parcela.

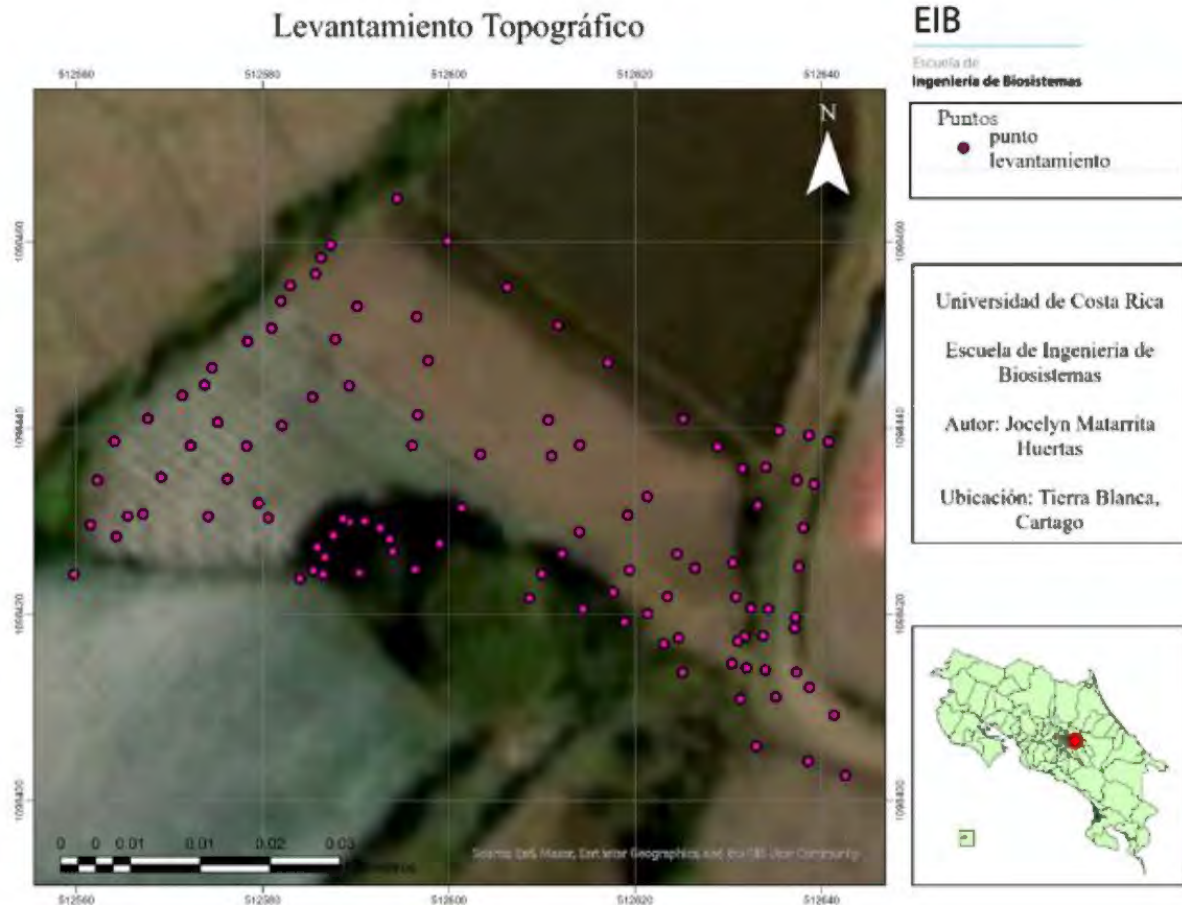


Figura 4. Puntos tomados en el levantamiento topográfico



Figura 5. Estación total TOPCON que se utiliza en el levantamiento topográfico. b) Prisma de la estación total

En las siguientes visitas se identificaron todos los componentes del sistema de fertirriego, como bombas, tanques de mezcla, tuberías y líneas de fertirriego, así como su distribución y ubicación. Además, se obtuvo información sobre el tipo de fertilizante, la frecuencia de

aplicación, el cronograma y la dosis junto con el riego, recolectando la mayor cantidad posible de datos útiles para el análisis del sistema en general.

Para obtener una caracterización del suelo, se realizaron pruebas físicas como la determinación de su textura, densidad aparente y conductividad hidráulica. Asimismo, se llevaron a cabo pruebas químicas para evaluar el estado nutricional del suelo, como el método KCl-Olsen modificado. Las muestras de suelo se tomaron de acuerdo con los parámetros establecidos por los laboratorios del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica.

En el caso de la densidad aparente y conductividad hidráulica, se extrajo una muestra para cada una utilizando cilindros de PVC, siguiendo las instrucciones del CIA. Estos cilindros tenían una altura de 5,09 cm, un diámetro externo de 5,10 cm, un diámetro interno de 4,98 cm y un grosor de pared de 0,40 cm (CIA, 2022), como se muestra en la Figura 6 a). Para su inserción en el suelo, los cilindros se clavaron verticalmente con un mazo de manera uniforme, lo que evita alterar la estructura del suelo.

Para la textura del suelo y la prueba química KCl-Olsen modificado, se recolectaron varias muestras en diagonal a lo largo de la parcela mediante un barreno. Las muestras se obtuvieron a una profundidad aproximada de 15 a 20 cm (ver Figura 6 b). Por último, las muestras se mezclaron y cuartearon, apartando una muestra de medio kilo de suelo para cada una de las pruebas de textura y química, respectivamente.

En el caso de la prueba química, se realizó la primera durante el periodo del cultivo en el mes de febrero y otra después de la cosecha para evaluar el estado del suelo en el mes de abril, durante y luego del ciclo productivo.



Figura 6. a) Cilindros que se utilizan para la recolección de muestras de conductividad eléctrica y densidad aparente. b) Recolección de muestras con barreno para textura y análisis químico del suelo

Con los datos que se obtienen de las pruebas físicas de densidad aparente y conductividad hidráulica, se calculó la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente utilizando las fórmulas de Peele (ver la Ecuación 2) y Briggs (ver la Ecuación 3), respectivamente. Además, se obtuvo el cronograma de fertirrigación durante el estudio, así como los tipos de fertilizantes y su dosificación, por parte del productor.

Para la determinación de la lámina aplicada por el productor se utilizó la ecuación de tasa de una línea de goteo (ver la Ecuación 4) (Washington State University, 2023). En esta ecuación, se utiliza el caudal del emisor (Q_e) en litros por hora, la eficiencia del sistema de riego (Eff) que es del 95 %, la distancia entre los emisores (D_{emi}) y la distancia entre los laterales (D_{lat}), ambos en metros, multiplicados por un factor de conversión para obtener milímetros por hora.

$$L\acute{a}mina\ aplicada = \frac{Q_e * Eff}{D_{emi} * D_{lat}} * 1 \frac{m^2 * mm}{L} \quad (4)$$

Para el cálculo de la lámina neta (Ln) teórica por aplicar se calculó mediante dos métodos diferentes con el fin de contrastar y comparar cual sería la más adecuada para el productor. El primer método se basó en asumir que se debe reponer la lámina perdida por evapotranspiración del cultivo (ET_c). Esto se realiza para riegos diarios, mediante el coeficiente del cultivo (K_c) y la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0). Para esto, se utilizó la ecuación del cálculo de la ET_c (ver la Ecuación 5) y los K_c de cada etapa de la cebolla y papa que se obtienen de la guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos de la FAO (FAO, 2006).

$$ET_c = ET_0 * K_c = Ln \quad (5)$$

El segundo método es basado en los requerimientos del suelo y características de la planta, bajo el supuesto de que el riego no se realiza diario, sino que se busca dar riego en una frecuencia determinada con el fin de reponer el agua que la planta ha consumido en los días sin riego. Cómo se puede ver en la ecuación 6, donde se implementa los porcentajes de capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP), la densidad aparente del suelo (Da) en g/cm^3 , un factor de agotamiento decimal (Ag) y la profundidad de las raíces (Pr) en metros (Calvo, 2005).

$$Ln = \frac{(CC - PMP)}{100} * Da * Pr * Ag \quad (6)$$

En ambos casos se calculó la lámina bruta (Lb) a aplicar mediante la ecuación 7, donde se divide la lámina neta por la eficiencia del riego. Además, se calculó una frecuencia de riego (Fr) designada según la lámina neta y la ET_c como se ve en la ecuación 8, para el caso de no regar de forma diaria (Calvo, 2005).

$$Lb = \frac{Ln}{\%eficiencia} \quad (7)$$

$$Fr = \frac{Ln}{ET_c} \quad (8)$$

3.3 Evaluación de la eficiencia del sistema de fertirriego

3.3.1 Elaboración de sensores Arduino para medir humedad y temperatura del suelo

Para la toma de datos de humedad y temperatura se utilizó la tecnología Arduino, ya que su implementación está cada día más presente en el campo de la agricultura al ser de *hardware* y *software* libre. En este caso, se decidió seguir metodologías ya establecidas y probadas en

proyectos publicados por la misma comunidad que utiliza esta tecnología (Alam, 2021; Sanches *et al.*, 2019).

Para su uso óptimo, se realizó un ensamble con un sensor de humedad capacitivo V1.2 y un sensor de temperatura DS18B20. Además, se utilizó una pantalla OLED que muestra los valores en tiempo real, como se observa en la Figura 7. Asimismo, se empleó una tarjeta Arduino Uno, una *protoboard*, cuatro baterías AA y varios cables puente. Es importante resaltar que, para este ensamble, el sensor de temperatura venía con un adaptador que permitía su funcionamiento correcto. En caso contrario, se debe implementar una resistencia de 4,7 k Ω entre los pines de señal digital y alimentación. El código que se utiliza para su funcionamiento correcto se puede ver en el Apéndice A.

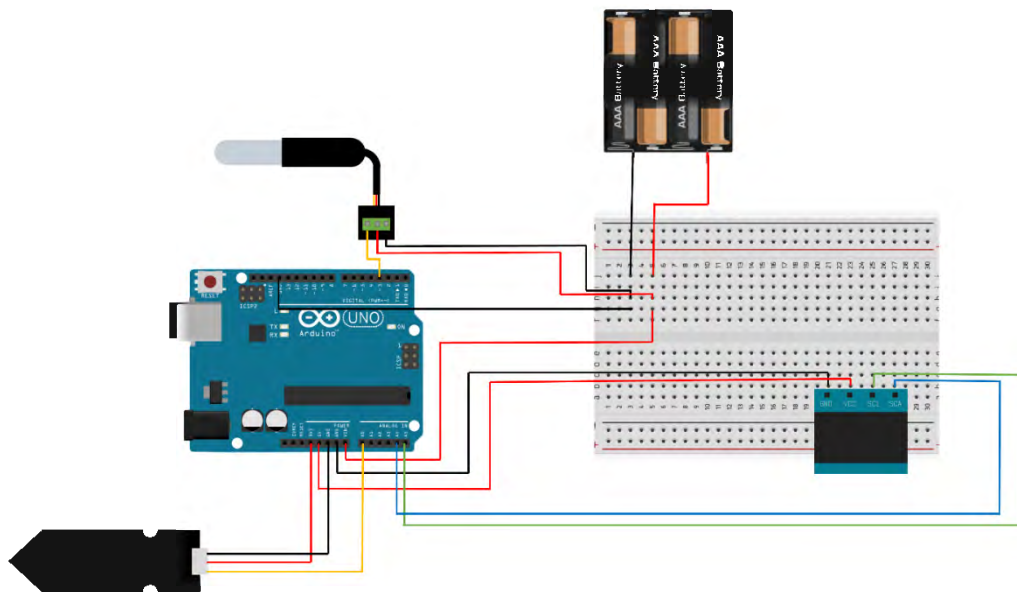


Figura 7. Configuración del ensamble diseñado para la toma de datos de humedad y temperatura

Asimismo, se construyeron tres ensambles en los cuales se calibró cada sensor de humedad capacitivo con una muestra del suelo de la parcela de estudio. Para llevar a cabo esto, se secó previamente el suelo en el horno a 120 °C durante 48 horas (ver la Figura 8) y se prepararon recipientes con 50 g de suelo seco cada uno. También se elaboró una escala del 0 % al 100 % de humedad, con intervalos de 10 %, utilizando un total de 11 recipientes por triplicado (ver la Figura 9).

Además, se estimó el contenido de humedad mediante la fórmula de humedad gravimétrica (ver la Ecuación 9) (García, 2017), en la cual se determinó la cantidad de agua necesaria para alcanzar un determinado valor de humedad, con base en el peso seco (Sánchez *et al.*, 2019). Posteriormente, se realizaron las mediciones de cada muestra usando los sensores capacitivos de humedad y se registró el valor analógico correspondiente a cada porcentaje de humedad. Esto se llevó a cabo con el objetivo de obtener la curva de mejor ajuste y la ecuación que describiera el comportamiento del sensor en el suelo de la parcela.

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = \frac{(\text{masa muestra húmeda} - \text{masa muestra seca}) * 100}{(\text{masa muestra seca})} \quad (9)$$



Figura 8. Secado del suelo en el horno



Figura 9. Preparación de los recipientes para la calibración del sensor de humedad

Para obtener la curva de mejor ajuste y su ecuación, se promediaron los resultados de las repeticiones, ya que se realizó por triplicado la escala de 0 %-10 % de humedad para los tres sensores calibrados. Sin embargo, al comportarse los sensores de forma muy similar, se obtuvo una gráfica promedio final como se ve en la Figura 10. De esta manera, se obtuvo una sola ecuación de ajuste para cualquier sensor capacitivo V1.2 por utilizar en la parcela, unificando los resultados de la calibración en un solo código.

Los datos de las repeticiones de los sensores pueden verse en el Apéndice B. Posteriormente, se procedió a definir la ecuación de mejor ajuste y se seleccionó una función polinomial de tercer grado, la cual se ajustaba más a su comportamiento con un R2 de 0,9302. Todo esto se llevó a cabo en el programa de Microsoft Excel.

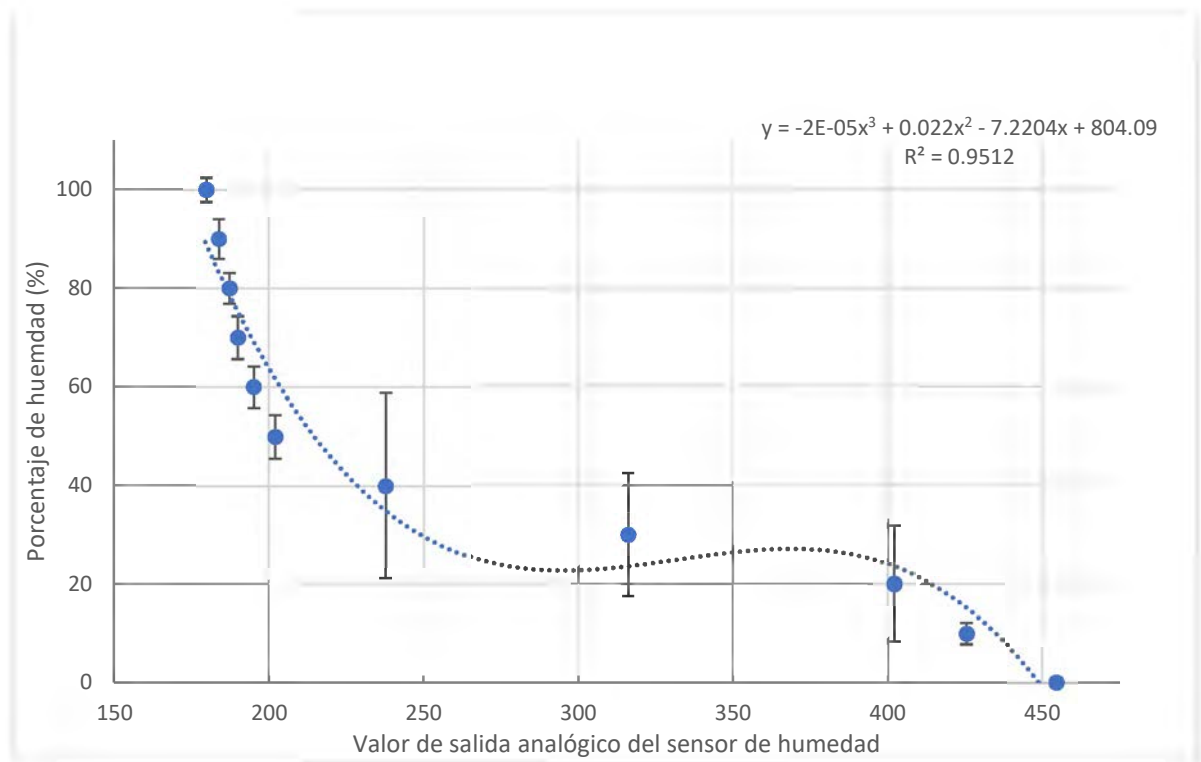


Figura 10. Curva de mejor ajuste para los valores que se obtienen en la calibración

La ecuación de la curva obtenida se introdujo en el código (ver la Ecuación 10). En dicha ecuación se indica evaluar los valores analógicos para obtener un porcentaje de humedad que se muestra en la pantalla.

$$f(x) = -0,00002211x^3 + 0,02202x^2 - 7,221x + 804,1 \quad (10).$$

En el caso del sensor DS18B20, se calibra previamente con un modelo desarrollado para la IDE de Arduino mediante la librería OneWire y DallasTemperature. Lo anterior se comprobó por medio de varias mediciones con otros sensores digitales, en este caso termómetros y no se presentaron diferencias en las lecturas del sensor DS18B20 en comparación con los otros termómetros.

3.3.2 Descripción de los métodos por utilizar en la evaluación de eficiencia del sistema de fertirriego

La evaluación del sistema se dividió en dos etapas. En la primera, se buscaba analizar el estado actual del sistema de fertirriego y determinar cuán homogénea era su distribución de agua y fertilizantes a lo largo de la parcela. Para esto, se realizaron mediciones al agua de riego mediante la recolección de muestras en recipientes, midiendo su caudal, conductividad eléctrica y pH. La segunda tenía como objetivo ver la influencia del riego en el suelo, cómo afectaba su temperatura y humedad en los días con aplicación de riego y sin aplicación de riego. Para este se implementaron los sensores Arduino previamente diseñados y calibrados, además de tensiómetros.

Para la primera etapa, en un sistema de riego por goteo separado en cuatro lotes, se midieron un total de 40 goteros, 10 por cada lote, como se muestra en la Figura 11. El primer método

usado para evaluar el sistema de fertirriego fue el coeficiente de uniformidad de riego (CU), utilizando la ecuación de Karmely-Keller (ver la Ecuación 1). En cuanto a la distribución de fertilizantes, se midió la conductividad eléctrica y el pH de cada muestra con un equipo de medición multiparamétrico de la marca HACH, modelo HD40D, con 2 sondas para cada parámetro ambas de la misma marca, como se presenta en la Figura 12. Para el pH la sonda correspondía a un electrodo modelo Intellical PHC201 con una exactitud de $\pm 0,02$. En cuanto la conductividad se utilizó una célula de conductividad de grafito de 4 polos, modelo Intellical CDC401 con una exactitud de $\pm 0,5\%$ de la lectura.

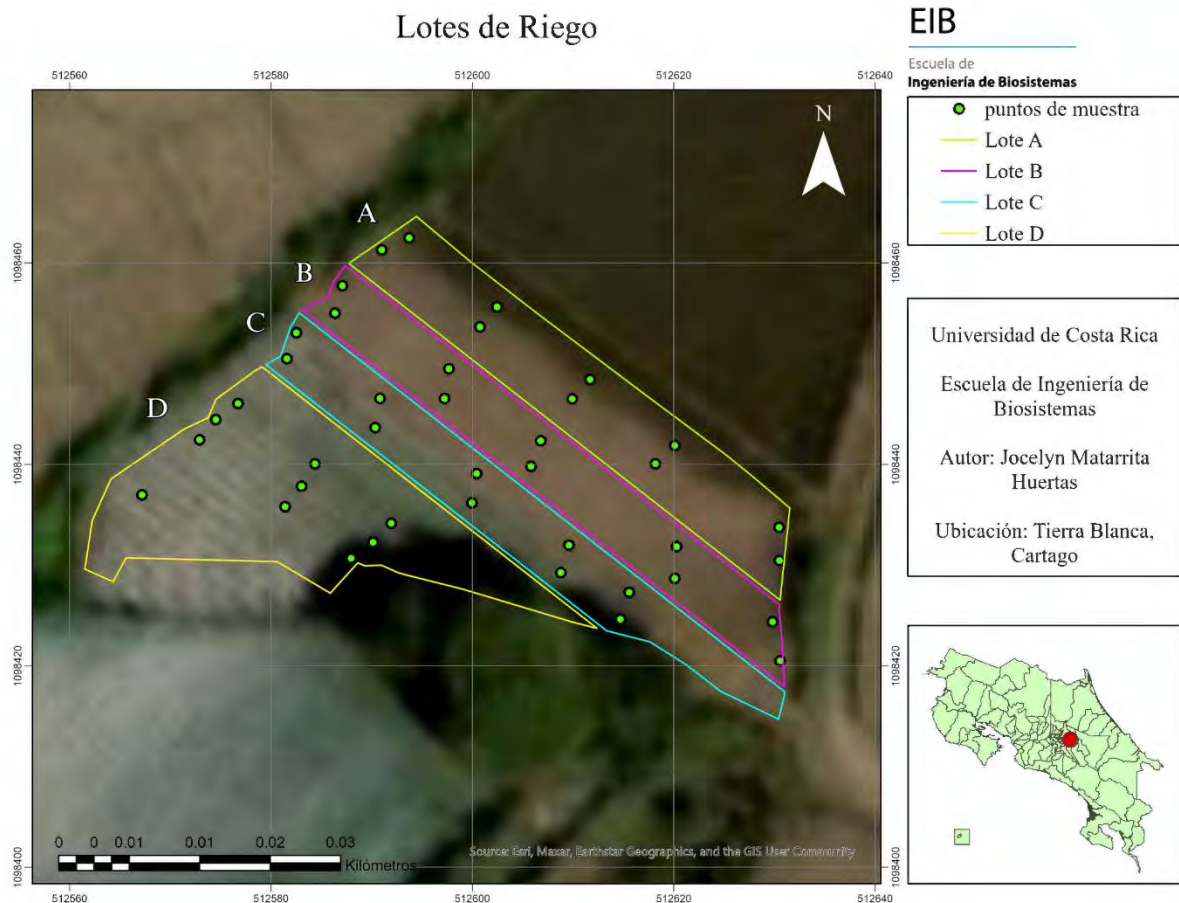


Figura 11. Puntos de medición para el coeficiente de uniformidad, conductividad eléctrica y pH



Figura 12. Puntos de medición para el coeficiente de uniformidad, conductividad eléctrica y pH

Para obtener una muestra representativa del fertirriego evitando rebalses, se recolectó la cantidad de agua que emitían los goteros en cuatro minutos. Para esto, se esperó a que las tuberías estuvieran totalmente llenas con la mezcla del fertilizante. Los fertirriegos tardan entre 20 y 30 minutos y se realizan de forma escalonada, es decir, un lote por operación. Por lo tanto, se espera hasta que el operario inyecte el fertilizante y a la mitad del proceso se colocan los vasos plásticos debajo del gotero seleccionado (ver Figura 13a).

Pasados los cuatro minutos, se retira el vaso del gotero y se procede a medir el pH y la conductividad eléctrica de cada uno, como se ve en la Figura 13b. Finalmente, se mide el volumen recaudado en ese tiempo con una probeta de 100 ml (ver Figura 13c). Se realizaron tres repeticiones, con el fin de conseguir un valor promedio representativo de cada punto de muestra.

Además, se realizaron mediciones de control en el agua que se utiliza en el riego sin el soluto (fertilizantes) proveniente del reservorio. En cada día de recolección de muestras, se midió el pH y la conductividad eléctrica, como se observa en la tabla del Apéndice C, en el apartado de agua pura.



Figura 13. a) Recolección de muestra del fertirriego. b) Medición del pH y conductividad de la muestra. c) Obtención del volumen de cada muestra

Los datos de cada medición se trataron mediante un análisis estadístico. Se obtuvo el promedio, la desviación estándar, el coeficiente de variabilidad y se realizó un análisis de varianza (Anovas) para determinar diferencias significativas entre los lotes de riego en cada variable estudiada. Con el promedio de estas tres mediciones, se realizaron mapas de interpolación de los 40 puntos utilizando los datos de caudal, conductividad eléctrica y pH. Esto permitió analizar de manera amplia el comportamiento del fertirriego en la parcela y posibles zonas de interés. Para llevar a cabo esta interpolación, se utilizó un modelo digital de distancia inversa interpolada (IDW) en ArcMap de ArcGis.

En la segunda etapa se buscaba evaluar el efecto del riego en el suelo, como este afectaba su humedad, temperatura y tensión matricial, así de esta forma lograr evaluar si existen zonas diferenciadas entre sí en los días con y sin aplicación de riego. Para esto se colocaron sensores según la información obtenida en la primera etapa, considerando los sectores de interés y la pendiente del terreno. Cada punto se identificó con una letra (A, B, C y D), como se muestra en la Figura 14. Se realizaron 6 días de medición en total: 3 días con aplicación de riego y 3 días sin aplicación de riego, durante una hora cada día. Durante esa hora, se tomaron mediciones cada 20 minutos, obteniendo un conjunto de 4 datos por día, los cuales se promediaban para obtener un valor representativo de cada día. Las mediciones se hicieron alrededor de las 7:00 a. m., ya que en los días con aplicación de riego a esa hora el fertirriego ya había finalizado.

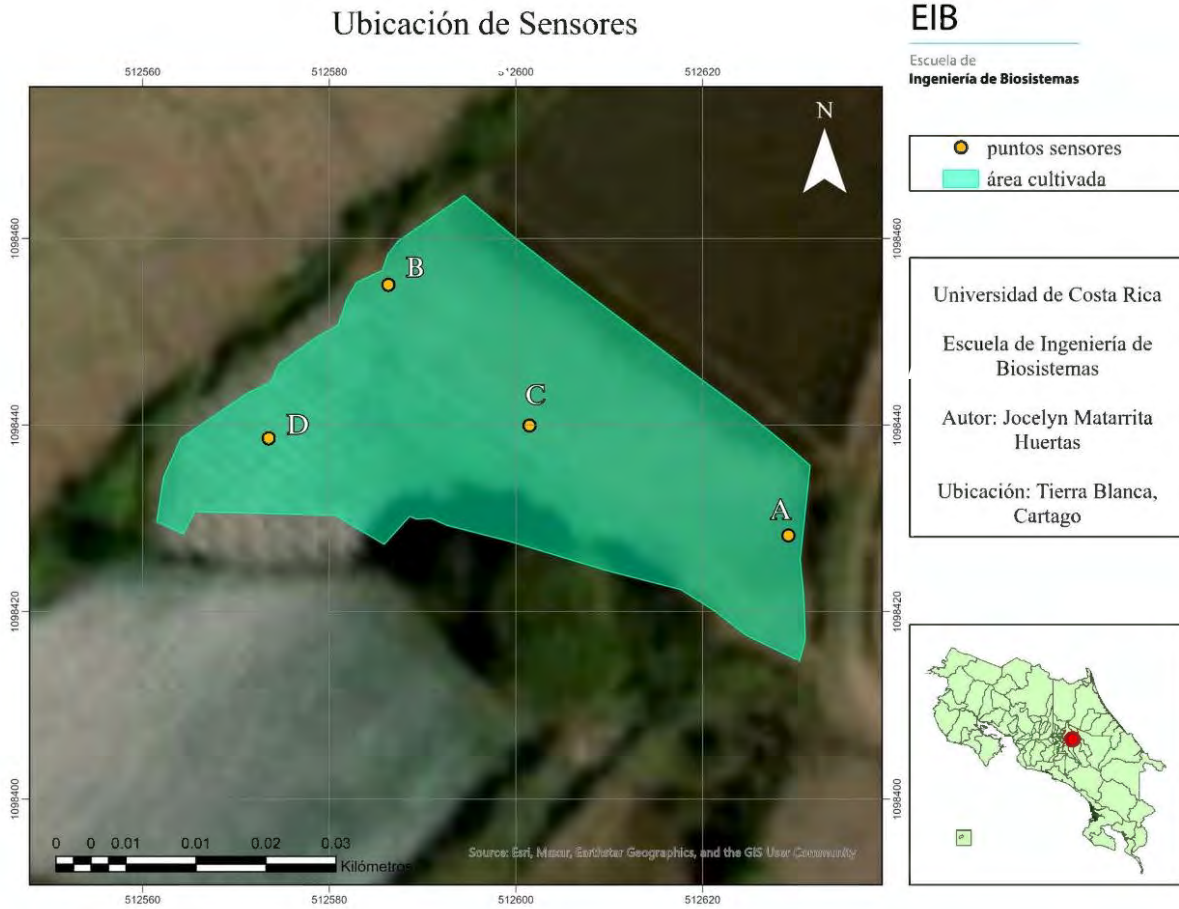


Figura 14. Puntos donde se ubicaron los sensores

Para obtener el porcentaje de humedad y la temperatura del suelo, se utilizaron los ensambles de sensores Arduino diseñados y calibrados para esta parcela. En el caso de los tensiómetros, se emplearon dos sensores de 30 cm, ambos de la marca Irrometer. Se colocaron en remojo toda la noche anterior y se llenaron antes de las mediciones, lo que evita la acumulación de burbujas en su interior (ver la Figura 15).

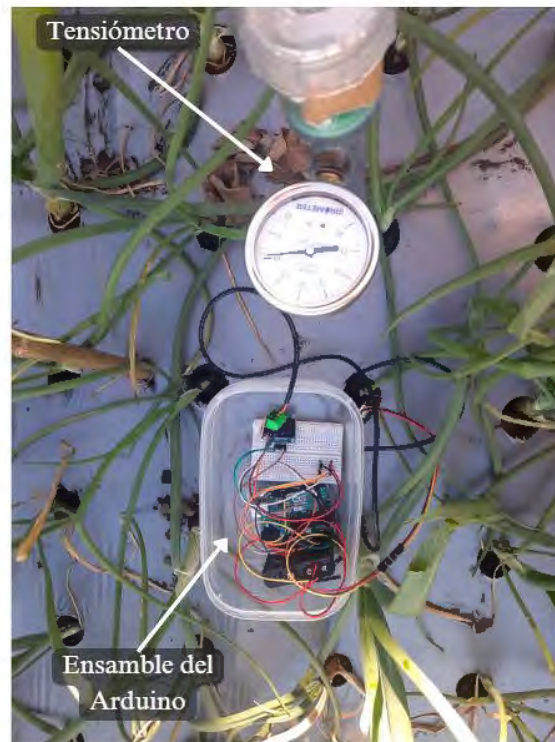


Figura 15. Sitios de medición dentro de la parcela para la toma de datos de humedad, temperatura y tensión

En la segunda etapa, se llevó a cabo el mismo análisis estadístico para determinar si existían diferencias significativas entre los días medidos y las variables que se estudian. Además, se calculó el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada variable medida según los días de aplicación de riego y sin aplicación de riego. Una vez completado el análisis estadístico de los datos, se realizó la interpolación de los datos en ArcMap de ArcGis mediante un IDW, obteniendo mapas de humedad, temperatura y tensión matricial, como se muestra en la Figura 16.

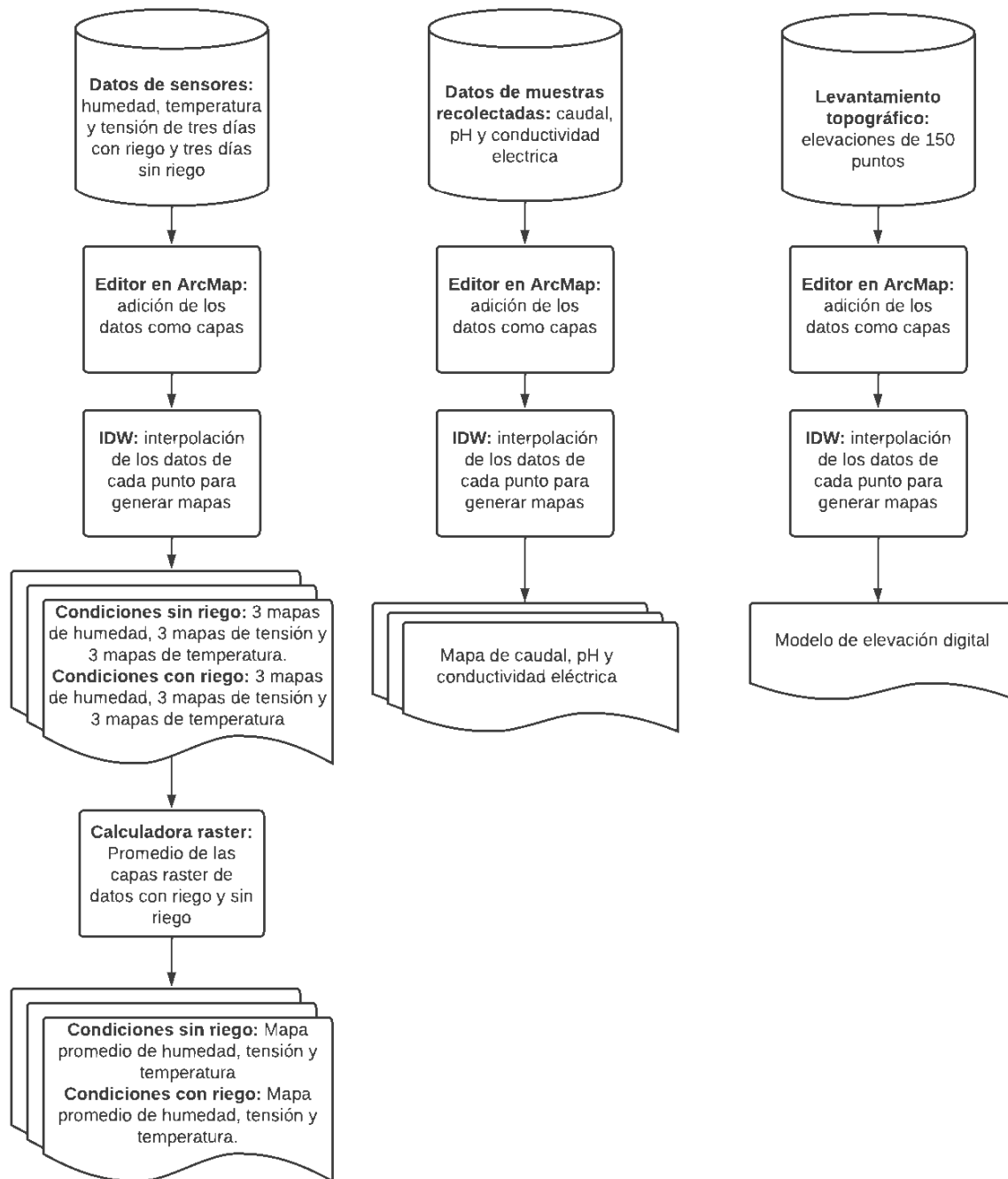


Figura 16. Diagrama del geoprocesamiento aplicado al caso de estudio

3.4 Identificación de los aspectos a mejorar y definición de las recomendaciones de la propuesta de mejora

3.4.1 Identificación de los aspectos a mejorar

Como primer paso de este objetivo, al tener claro el diagnóstico de la parcela y el resultado de las pruebas, se identificó el estado del suelo para las recomendaciones sobre los fertilizantes y actividades agrícolas realizadas. Además, al identificar las zonas con anomalías, como poca humedad, poca o nula presencia de fertilizante o exceso de este, se valoró qué factor

podría afectar de forma directa este comportamiento en el fertirriego para su corrección, como el cambio de infraestructura o la implementación de equipos más especializados.

Para todos estos diagnósticos, se tuvo en cuenta la opinión de especialistas en el tema, como el ingeniero agrónomo y profesor de la Universidad de Costa Rica, Manuel Camacho, para el análisis de suelo y recomendaciones sobre el manejo de agroquímicos. Además, se contó con la asesoría del ingeniero agrícola especialista en riego de Netafim, Manuel Alfaro, para obtener información sobre la infraestructura de riego, equipo y tecnología que se utiliza en el mercado. Asimismo, se consideraron las inquietudes que el mismo productor presentaba a lo largo del proceso productivo en relación con el desarrollo del cultivo y las dificultades técnicas en el equipo de fertirriego.

3.4.2 Determinación de la propuesta de mejora

Una vez que se identifican los problemas y las áreas que afectan, se determinaron recomendaciones técnicas que el productor pudiera realizar, las cuales influirían de forma significativa en la mejora del sistema. Para esto, también se contó con la ayuda de especialistas en el tema, con el fin de brindar soluciones más cercanas a la realidad que se vive en las zonas productivas de Costa Rica, utilizando equipos y productos que se pueden obtener fácilmente en la zona.

Como resultado del análisis de los resultados, se encontraron cuatro aspectos los cuales forman parte de la propuesta de mejora. El primero corresponde a las prácticas agrícolas y de conservación de suelo, que el mismo productor puede realizar para mejorar el estado del suelo y del sistema actual. Además de la elaboración de un cronograma nuevo de riego mediante el cálculo de tiempo de riegos basados en la laminas recomendadas.

Para el cálculo de duración de riego (T) en base a la nueva lamina se utilizó la ecuación 11, donde se implementa la lámina bruta correspondiente (lb), los espaciamientos entre goteros (De) y entre laterales (Dl) en metros, el caudal del gotero en l/h (Qe) y el número de emisores por planta (n). Además de considerar la intensidad de aplicación (Ia) de las líneas de riego, ya que esta debe ser menor a la conductividad hidráulica del suelo, así que se calculó la misma mediante la ecuación 12. Con estos valores puede proponerse un cronograma de riego nuevo que se ajuste a las necesidades del productor.

$$T = \frac{lb * De * Dl}{n * Qe} \quad (11)$$

$$Ia = \frac{Qe}{(De * Dl)} \quad (12)$$

Otro aspecto para evaluar es el uso energético de la bomba para fertirriego en los diferentes casos, tanto en la aplicación actual como en los casos teóricos mediante la evaluación del uso de la bomba en kWh por mes, mediante la ecuación 13 donde se multiplica la potencia (Pot) del equipo en kW por las horas al mes que se usa el equipo (Hmes).

$$\text{Consumo mensual} = Pot * Hmes \quad (13)$$

El segundo es la distribución de la parcela y de la infraestructura, en donde las recomendaciones van dirigidas a la configuración espacial de esta. El tercer aspecto es el equipo de fertirriego, ya que se pueden obtener mejores resultados con optimizaciones o cambios en los equipos que se utilizan. También se estima calcular

por último, la implementación de tecnología y sensores. Este último es muy importante, pues incorpora lo implementado en el estudio para su evaluación como una herramienta diaria en la toma de decisiones que mejora su rendimiento y manejo de recursos.

4. RESULTADOS

4.1 Caracterización de la parcela

4.1.1 Distribución física

La parcela de estudio se encuentra ubicada en Tierra Blanca de Cartago, en la propiedad del productor Santiago Vega Víquez, coordenadas 512 600,95 E y 1 098 439,09 N. Según se observa en la Figura 17 se delimitó la parcela y se comparó con el catastro de la finca, como resultado del reconocimiento del área y del levantamiento topográfico. Es importante destacar que el productor utiliza menos terreno del que posee debido a desplazamientos geográficos que han ocurrido en las parcelas vecinas. Por lo tanto, se trabajó en el área que actualmente usa el productor, la cual está señalada en amarillo.



Figura 17. Identificación de la parcela de estudio mediante imagen satelital

El lote utiliza un área de 1914,66 m² para fines agrícolas. En este se encuentra un invernadero de 90 m², un reservorio de agua y una pequeña área con las herramientas para el fertirriego, como se muestra en la Figura 18. Excluyendo el área que ocupa el invernadero, el área de fertirriego, el reservorio, los caminos y la cobertura boscosa, el área cultivada es de aproximadamente 1663 m².

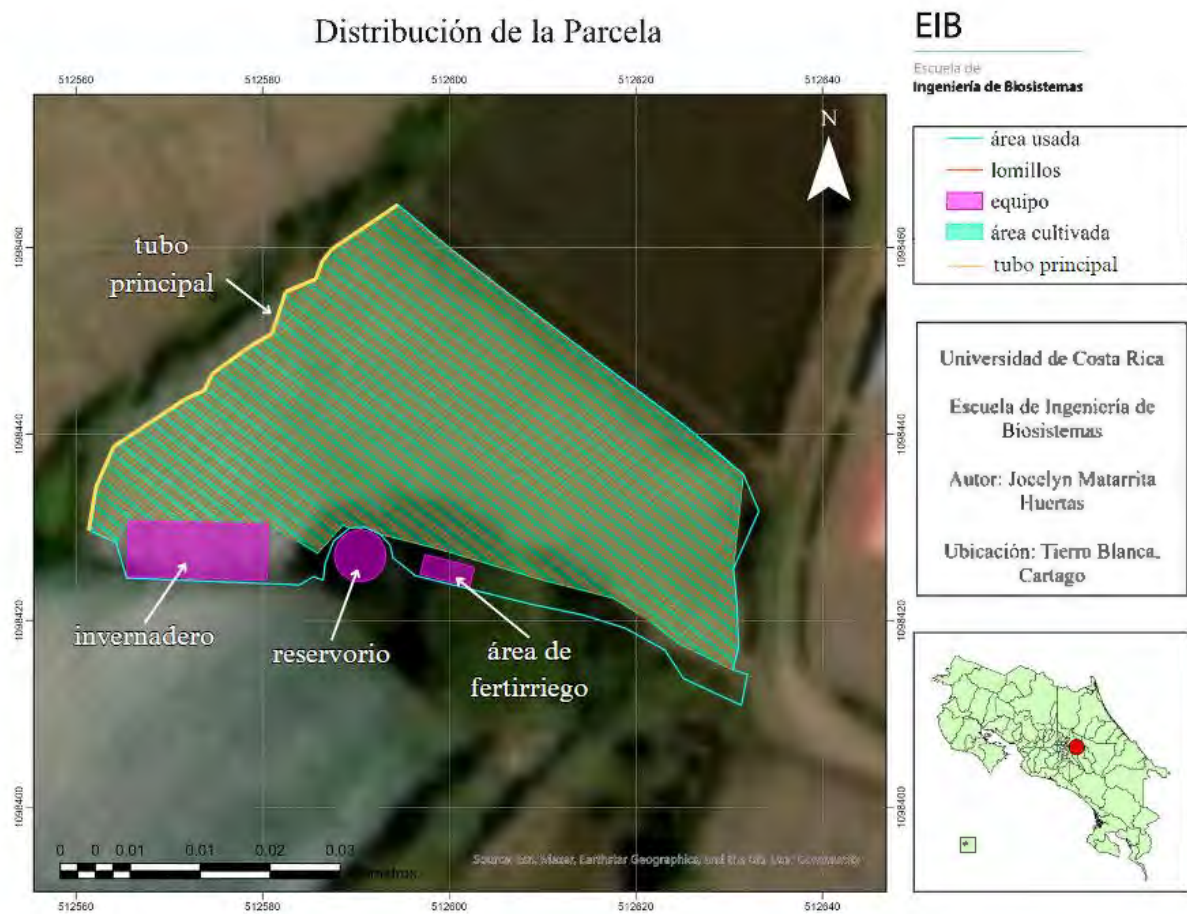


Figura 18. Distribución de la parcela

Del área cultivada, 1517 m² corresponden a cebolla y 145 m² a papa. La cebolla es el cultivo que cubre en su mayoría la parcela, como se observa en la Figura 17. La cebolla cultivada corresponde a las variedades Predator y Mata Hari, de color amarillo y rojo respectivamente. La Predator es la predominante en todo el cultivo, pero el productor no estableció un área específica o una cantidad determinada, sino que estas se podían encontrar mezcladas con las Mata Hari. En cuanto a las papas, se cultivaron las variedades Floresta y Única. Estas se cultivaron para su reproducción como *semillas*. De igual manera, el productor no determinó una cantidad o un área específica para cada una de las variedades.

La parcela se encontraba dividida en cuatro lotes, como se ilustra en la Figura 11. Los lotes eran regados uno a la vez, de forma escalonada. Los lotes A, B y C poseían un área similar entre sí, siendo de 395 m², 350 m² y 335 m² respectivamente. Por otro lado, el lote D era de 520 m², este último es el lote más grande de los cuatro. La parcela tenía un total de 36 lomillos, como se puede ver en la Figura 18. Los lomillos tenían un ancho de 90 cm y una separación de 40 cm y contaban con diferentes longitudes.

El lote A tenía 6 lomillos, el B y C tenían 5 y el lote D contaba con 20. Este se caracterizaba por tener la mayor cantidad de lomillos, pero de longitudes cortas y con menor diferencia de altura. En cambio, los lotes A, B y C presentaban los lomillos más extensos y con mayor diferencia de altura. Además, se encontró que solo el lote D tenía una combinación de cultivo, papa y cebolla, mientras que los lotes A, B y C eran exclusivos de cebolla.

Con respecto al levantamiento topográfico, se obtuvieron elevaciones que van desde los 2320,77 m. s. n. m. hasta los 2336,84 m. s. n. m., con una diferencia de 16,07 m entre el punto más bajo del lote y el más alto. Al ser una parcela relativamente pequeña, se realizó el análisis de las elevaciones en cuatro clases, con el fin de obtener diferencias en cuatro zonas de elevación distintas. En la Figura 19 las zonas de color verde claro y amarillo representan la zona media de la parcela, mientras que la zona verde oscuro corresponde a la más baja y la zona roja a la más alta.

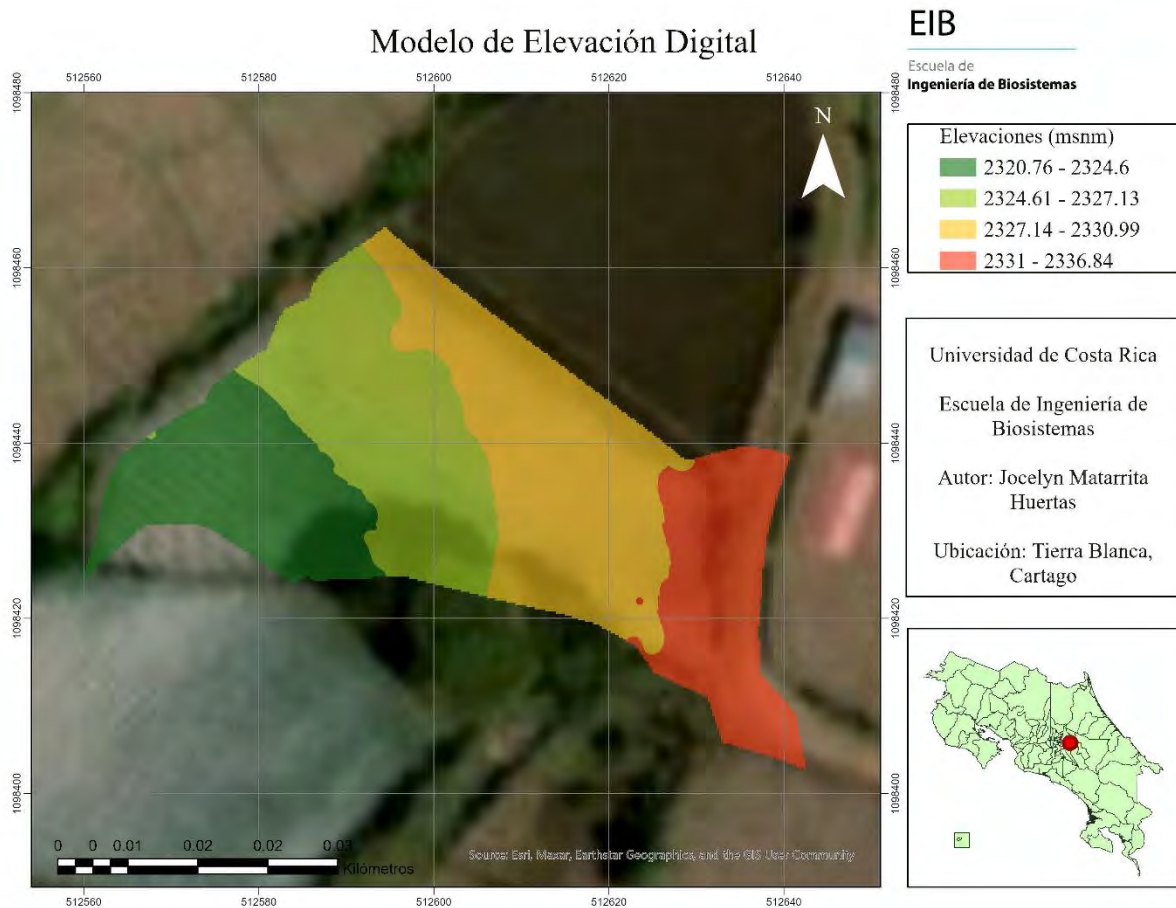


Figura 19. Elevaciones de la parcela de estudio

4.1.2 Componentes del fertirriego

El sistema de fertirriego se instaló desde el 2018. Cada lomillo tiene cuatro líneas de riego por goteo autocompensado, con una separación entre ellas de 18 cm. Estas líneas están colocadas debajo de una cobertura plástica (*mulch*) de color plata en la superficie y negro en el reverso, con líneas de 8 agujeros. Esto se puede observar en la Figura 21 a) y b).

En cuanto a las líneas de goteo, los lotes A, B y C tienen una cinta de 1 l/h con goteros cada 20 cm. Por otro lado, el lote D tiene una cinta de 1,6 l/h con goteros cada 15 cm. Estas cintas son de la marca Netafim DripNet PC. Se valorizó la cinta y se evidenció que en efecto es una cinta de polietileno con gotero autocompensado integrado. Esto se puede ver en la Figura 20 c).

Aunque el productor desconocía el modelo en específico, en consulta con un ingeniero de la empresa se determinó que la cinta de 1 l/h debía ser el modelo 16150. Sin embargo, no se identificó el modelo de la cinta de 1,6 l/h a pesar de las consultas.

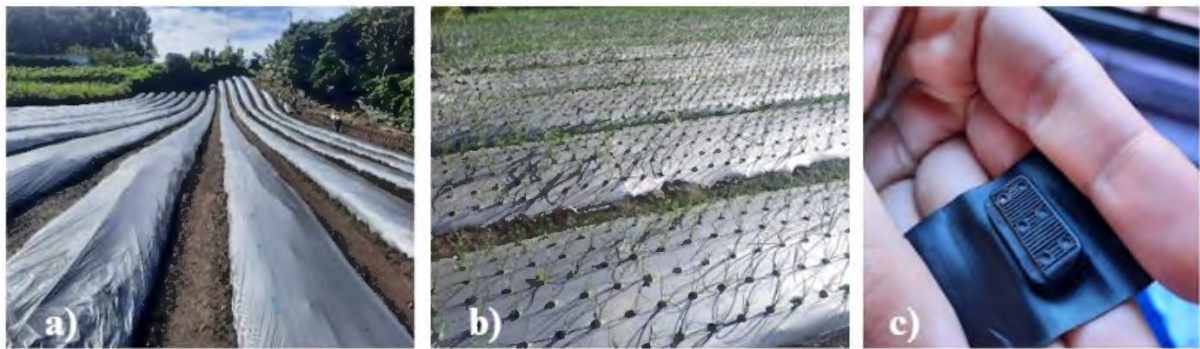


Figura 20. a) Cobertura plástica (mulch) de los lomillos. b) Mulch con los agujeros realizados. c) Segmento de la cinta de goteo usada en el sistema

En relación con el sistema de fertirriego, se encontró que el productor cuenta con una zona donde tiene todo el equipo utilizado en fertirriego donde lleva a cabo de manera manual la mezcla e inyección del fertilizante. Además, el productor se encarga de gestionar la presión de trabajo, que se mantiene alrededor de los 1,5 bar, utilizando un manómetro como se muestra en la Figura 21. Este manómetro le permite determinar si es necesario regular el caudal, ya sea al abrir o cerrar las válvulas de forma manual y una a la vez.



Figura 21. Manómetro que se utiliza para gestionar la presión de trabajo

El agua que se utiliza en el fertirriego proviene de un reservorio que se encuentra dentro del lote del productor. La misma se extrae con una bomba sumergible, de la cual no se tiene mayor registro como marca, modelo o potencia, ya que por su ubicación no fue posible inspeccionarla. El productor indicó que es similar en cuanto a potencia a la bomba que está en el exterior, sin embargo, como se puede ver en la Figura 22 el agua se bombea del reservorio a una batería de filtros de anillos en paralelo. Luego, se envía a la tubería principal donde se realiza la inyección del fertilizante mediante una bomba de menor tamaño (ver la Figura 23).

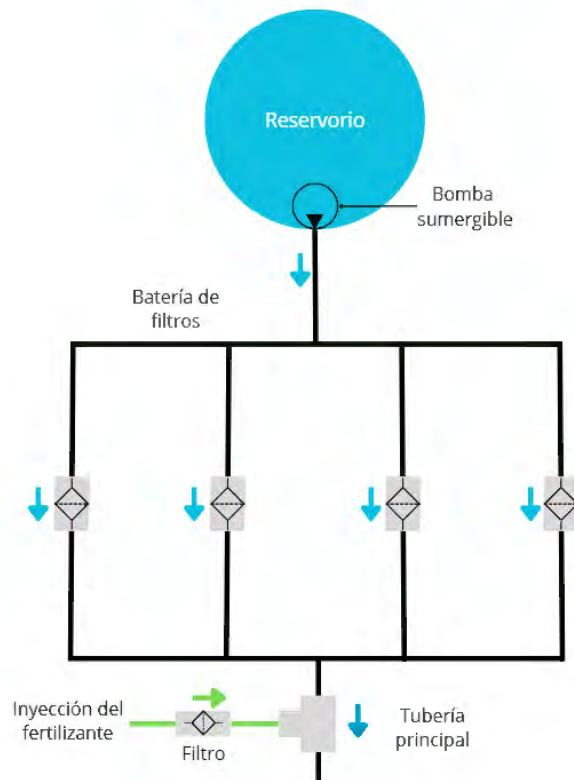


Figura 22. Diagrama del bombeo de agua desde el reservorio a los filtros



Figura 23. Batería de filtros y Venturi que se utiliza para la inyección del fertilizante

La finalidad de este ensamble es filtrar el agua de las impurezas que pueda tener antes de llegar a las cintas de goteo, las cuales se pueden obstruir fácilmente por material orgánico. Los filtros de anillos que se utilizan son de la marca Azud (100 micras, 150 mesh). Además, el productor busca con la segunda bomba una distribución de fertilizante más uniforme y proporcional al caudal enviado, introduciendo el fertilizante dentro de la tubería principal de 2 pulgadas por tandas. Como se puede observar en la Figura 24, esta estación es pequeña y de funcionamiento manual, ya que el productor maneja las conexiones, mezclas y tiempos de fertirriego en tiempo real según su criterio.



Figura 24. Sistema de bombas, válvulas y conectores que se utiliza del fertirriego de forma manual

Esta estación constaba de dos tanques de agua: uno funcionaba como reservorio temporal y el otro como mezclador de la solución de fertilizante. En la Figura 25 a), se puede observar cómo el tanque de agua suministra agua al tanque de mezcla, que tiene una capacidad de 60 l, mediante una bomba. Una vez que se ha llenado y mezclado, se bombea, desde el tanque de mezcla hasta la tubería principal, pasando primero por un filtro de anillos (ver Figura 25 b).

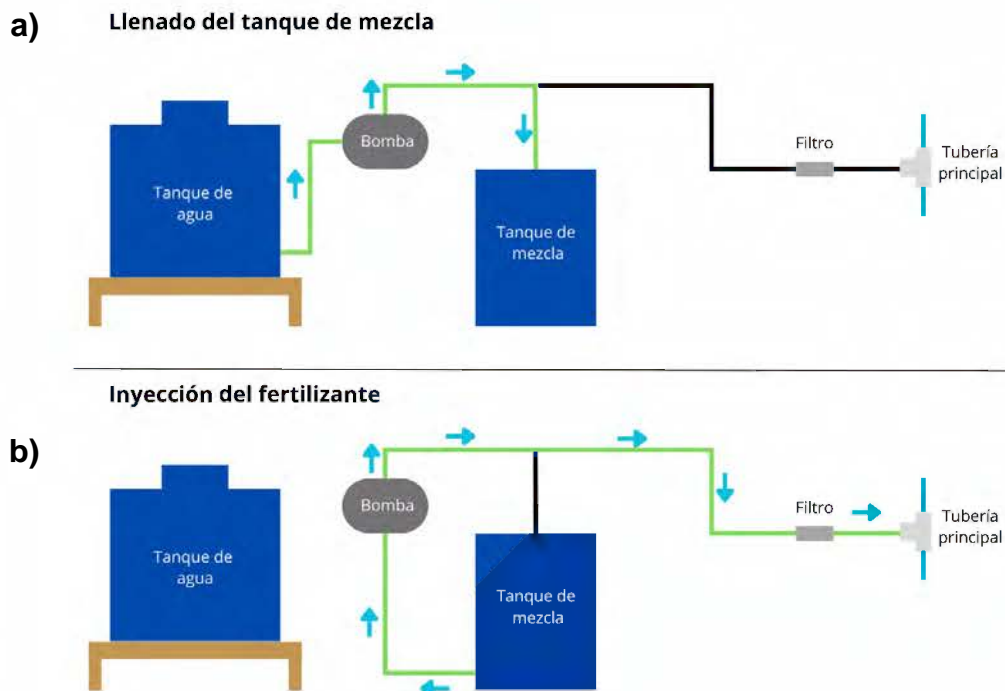


Figura 25. a) Configuración para el llenado del tanque de mezcla. b) Configuración para la inyección del fertilizante a la tubería principal

Como se mencionó, toda gestión de conexiones con la bomba se realiza de forma manual por medio de mangueras que el productor conecta y desconecta a los tanques. El fertilizante se echa en polvo dentro del tanque y con un tubo el productor lo mezcla hasta disolverlo (ver Figura 26 a). El productor distribuye de manera equitativa la solución de 60 l de fertilizante y se envía 15 l a cada lote. Mediante un nivel de manguera a la par del tanque de mezcla, el productor tiene realizadas las marcas donde puede asegurarse de manera visual cuánto fertilizante ha enviado en el fertirriego (ver Figura 26 b). Cuando ya llega el nivel a la marca establecida, se detiene el bombeo del fertilizante y se mantiene el bombeo solamente del agua.



Figura 26. a) Mezclado del fertilizante por parte del productor, b) nivel de manguera utilizado para la distribución del fertilizante en los lotes

Los periodos de riego tardan de 20 a 30 minutos. En los lotes A, B y C, aproximadamente 15 minutos son de fertirriego. Para el lote C, el tiempo de riego es de 15 minutos, donde 10 minutos son de fertirriego. Esto se debe a que el productor estima que el fertilizante se distribuye más rápido en el lote D debido a su topografía poco pronunciada e hileras más cortas en comparación con el resto. Además, el caudal que emiten los goteros en el lote D es mayor, con líneas de 1,6 l/h.



Figura 27. Bomba que se utiliza para la inyección del fertilizante en la tubería principal

La bomba implementada para la inyección del fertilizante es una Lucky Pro, modelo MRSS5, con una potencia de 1,25 HP (se observa en la Figura 27). Esta bomba se ensambla y desconecta

todos los días en los que se realiza el fertirriego, por lo tanto, no está instalada de forma permanente en el sitio. Esto se debe a que la parcela no se considera una zona segura para dejar el equipo instalado sin protección.

En cuanto al cronograma de fertirriego, el productor lo realiza tres veces por semana, día por medio. Siempre que lleva a cabo el riego, lo acompaña de fertilizante en los primeros minutos. El tiempo restante solo se utiliza para aplicar agua pura y realizar un lavado en las líneas de riego, asegurándose de que la planta reciba el agua correspondiente a lo que el productor establece.

Se observó que, en las zonas de mayor elevación, ilustradas anteriormente en la caracterización de la finca mediante el modelo de elevación digital, el tiempo de riego con agua pura era más prolongado que en las zonas menor elevación, ya que el mismo productor evidenciaba un crecimiento más lento en dichas zonas mayor elevación.

El riego siempre se realiza en las horas de la mañana, cerca de las 6:00 a. m., regando un lote a la vez. Para esto, el productor suele abrir manualmente las válvulas de cada línea de riego (ver la Figura 28) en el lote correspondiente, para luego cerrar las del lote anterior y así evitar una subida en la presión del sistema.



Figura 28. Válvulas de cierre de cada línea

4.1.3 Características físicas y químicas del suelo

Una vez que se obtienen los resultados del análisis físico del suelo por parte del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), se encontró una textura franco-arenosa, donde el 70 % es arena, el 18 % limo y el 12 % arcilla. Además, se obtuvo una densidad aparente de $1,2 \text{ g/cm}^3$ y una conductividad hidráulica de 46 cm/h.

Con estos porcentajes se pudo calcular, utilizando la fórmula de Peele (ver la Ecuación 2), la capacidad de campo de 12.91 % y el punto de marchitez permanente usando la fórmula de Briggs (ver la Ecuación 3), que dio un 6.70 %. En cuanto a la conductividad hidráulica, esta se considera alta y cataloga al suelo como muy permeable, lo cual era de esperarse debido a su origen volcánico (Macías *et al.*, 2018).

Según Pascual España y Pascual Seva (2020), un suelo franco arenoso debe tener una densidad entre 1,4-1,6 g/cm³, de hecho, que sea menor evidencia que es un suelo que ha sido labrado de forma intensiva. Su capacidad de campo debe estar entre 10 %-18 %, por lo tanto, basado en el autor se considera adecuada al estar dentro del rango.

El punto de marchitez permanente está en un rango de 4 %-8 %, el cual también se considera adecuado, por ende, se puede asumir que las características son apropiadas para el tipo de suelo que tiene la parcela.

Con respecto a las dosis de nutrientes aplicadas, se estudió el efecto en el suelo durante el ciclo del cultivo y después de la cosecha, donde ya no se realizaban fertirriegos, ya que cada riego llevaba fertilizantes. De las tres aplicaciones semanales, dos eran con el fertilizante 12-43-12 + ME (12 % de nitrógeno, 43 % de fósforo y 12 % de potasio). Por otro lado, una vez a la semana se aplicaba calcio agrícola (CaO). Las dosis eran de 1,5 kg en 60 l de agua, para cada uno de los casos.

En los resultados del análisis químico del suelo en la Tabla I se observa que la mayoría se encuentra por encima del valor de control. Con respecto a la variación durante y después del ciclo, es poca o incluso aumenta debido a las fertilizaciones, lo cual indica que no hubo un agotamiento del suelo durante el ciclo productivo (Molina, 2011), por lo cual nos indica que lo aplicado en cada riego cumple con las necesidades con lo que pide la planta

Tabla I. Resultados de los análisis químicos del suelo, un mes antes de la cosecha y 15 días después de la cosecha en los laboratorios del CIA en la UCR.

Parámetro	Valores críticos de referencia	Durante el ciclo	Después de la cosecha	Unidades
H ₂ O	5,5	6,0	5,9	pH
Acidez	0,5	0,11	0,14	cmol (+)/l
Calcio (Ca)	4	6,21	5,72	cmol (+)/l
Magnesio (Mg)	1	2,60	2,17	cmol (+)/l
Potasio (K)	0,2	1,00	0,77	cmol (+)/l
CICE	5	9,92	8,80	cmol (+)/l
SA	-	1	2	%
Fósforo (P)	10	79	124	mg/l
Zinc (Zn)	3	8,7	18,0	mg/l
Cobre (Cu)	1	20	22	mg/l
Hierro (Fe)	10	123	178	mg/l
Manganeso (Mn)	5	3	11	mg/l
CE	1,5	0,3	0,3	mS/cm
Carbón (C)	-	1,68	1,72	%
Nitrógeno (N)	-	0,18	0,19	%
C/N	-	9,3	9,1	Relación

CICE= Capacidad de cambio catiónico efectiva.

SA=Saturación de acidez.

CE=conductividad eléctrica.

Según Molina (2011), se puede observar con más detalle que el pH del suelo se encuentra en valores óptimos, lo cual beneficia la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes en

este. El porcentaje de acidez en ambos casos se mantiene similar y se consideran valores óptimos por debajo del 0.3 %. En cuanto al Ca, Mg y K, todos mantienen valores considerados óptimos, incluso altos, lo que permite que el suelo pueda estar en equilibrio cuando se produzcan los intercambios catiónicos.

En relación con la SA, se considera que valores mayores al 10 % afectan negativamente el crecimiento, por lo tanto, se valora como óptima, tanto durante como después del ciclo. De igual manera, con la CICE que se encuentra por encima de su valor crítico, lo cual da la posibilidad de que el suelo pueda liberar con facilidad nutrientes cuando estos se agoten en la solución del agua, manteniendo el equilibrio químico (Martínez, 2020).

En cuanto a los demás nutrientes, todos se encuentran en abundancia en el suelo, en especial el P, el cual es importante para la fertilidad del suelo. En suelos de origen volcánico, como el estudiado debido a su cercanía al volcán Irazú, poseen alta fijación de P que limita su disponibilidad para las plantas. Por ende, para cultivos intensivos se necesitan dosis muy altas, donde se recomiendan valores mayores de 50 mg/l. Para este caso, tanto durante como después de la cosecha, sus valores son mucho mayores que lo mencionado, lo cual indica la eficiencia de los fertirriegos en la parcela (Molina, 2011).

Además, es importante mencionar que la conductividad eléctrica (CE) está por debajo del valor crítico, lo cual refleja el bajo contenido de sales solubles en el agua y el suelo. Se considera que para la cebolla el umbral debe ser de 1,2 mS/cm y para la papa 1,7 mS/cm (Tanji y Kielen, 2002). Esto hace que ambas sean sensibles a la salinidad, por lo tanto, el hecho de que el valor de CE esté por debajo del valor de control no presenta ninguna implicación negativa para los cultivos. Al contrario, un valor alto restringiría su crecimiento ya que sobrepasaría sus umbrales (García *et al.*, 2015).

Con respecto a los contenidos de C y N, estos se mantuvieron casi constantes y poseen una buena relación. El porcentaje de C se utilizó para calcular el porcentaje de materia orgánica (MO), multiplicando por 1,43 como indica el CIA. Para esto, se obtuvo un 2.4 %, que es un valor medio para el suelo y que puede mejorar (Molina, 2011).

4.1.4 Evaluación de la lámina aplicada

En cuanto al cálculo de la lámina aplicada por el productor se utilizó la ecuación 4, donde se implementó para cada cultivo el caudal que le correspondía según la cinta de goteo que tenía asignada y el tiempo que duraba el riego para cada uno. En este caso, los lotes con cintas de 1 l/h se riegan durante 20 min, que corresponde a la cebolla y el lote con la cinta de 1,6 l/h durante 15 min para el caso de la papa y cebolla del lote D. Por lo tanto, se obtienen las siguientes láminas (Tabla II).

Tabla II. Láminas aplicadas actualmente por el productor.

Cebolla	
Q _e (l/h)	1
Lámina (mm/d)	7,92
Papa	
Q _e (l/h)	1,6
Lámina (mm/d)	9,5

Es importante resaltar que el productor mantiene un cronograma de riego muy similar a lo largo de toda la temporada, con un misma lamina sin importar el estadio del cultivo (etapa inicial, media o final). Para evaluar esta aplicación si es adecuada o no, se estimó la lámina en base a un riego diario utilizando el valor de la ET_C correspondiente (ecuación 5) y también la lámina en base a características del suelo y de la planta (ecuación 6), con esto obteniendo la lámina bruta y frecuencia de riego (Ecuación 7 y 8).

Para el valor de Et_0 necesario para el cálculo de la ET_C correspondiente se utilizaron los valores de un estudio realizado en el 2017 para la zona de Tierra Blanca, Cartago, con el método FAO Penman-Monteith. En dicho estudio se obtuvieron valores de Et_0 para cada mes para la estación del Sanatorio (Quesada, 2017), lo cuales se consideran apropiados, ya que la parcela se encuentra a un costado del Sanatorio.

Es importante destacar que este método sirve como una guía aproximada, pero existen otros procesos que también interfieren en el proceso de evapotranspiración del cultivo. Para estos procedimientos se necesitan estudios más precisos, con el fin de conseguir un balance hídrico. No obstante, para los fines de este estudio, se considera adecuado utilizar este método.

En el caso de este análisis se abarcaron los meses en los que se realizó el estudio, desde diciembre del 2022 hasta marzo 2023, donde ya el cultivo se encuentra en su etapa final. Se asigno un K_c correspondiente a cada mes según la guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos de la FAO (FAO, 2006). Y se obtuvo los siguientes resultados para la cebolla y papa (Tabla III). Es importante recalcar que el productor al usar mulch, el mismo influye en una reducción en los valores de K_c entre el 10-30% (FAO, 2006), en este caso se asumió una reducción del 30% considerando que su efecto es óptimo sobre el cultivo.

Tabla III. Láminas de riego diarias según la ET_C correspondiente.

Cebolla				
Mes	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Etapa fenológica	inicial	Media	Media	Final
K_c	0,7	1,05	1,05	0,75
Et_0 (mm/d)	2,57	2,97	3,34	3,62
K_c con mulch	0,1	0,74	0,74	0,53
ET_C (mm/d)	0,26	2,18	2,45	1,90
I_n (mm/d)	0,27	2,30	2,58	2,00
I_b (mm/d)	0,28	2,42	2,72	2,11

Papa				
Mes	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Etapa fenológica	Inicial	Media	Media	Final
K_c	0,5	1,15	1,15	0,75
Et_0 (mm/d)	2,57	2,97	3,34	3,62
K_c con mulch	0,1	0,81	0,81	0,53
ET_C (mm/d)	0,26	2,39	2,69	1,90
I_n (mm/d)	0,27	2,52	2,83	2,00
I_b (mm/d)	0,28	2,65	2,98	2,11

Con estos resultados podemos contrastar que en la etapa inicial debido al mulch el riego es mínimo, considerando este con una frecuencia diaria, mientras que el máximo riego se encontraría en las etapas medias, en especial en febrero en ambos casos, aun así, ninguno supera los 3 mm/d. Por lo tanto, si se considera lo detallado en la tabla I, las cuales son laminas con frecuencias de día por medio, en base a este primer análisis se consideran sobredimensionadas.

Para el caso de un riego no diario, se contemplan los aspectos del suelo y cultivo con la ecuación 6, usando los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, previamente calculados y la densidad aparente del suelo. Para la profundidad de raíces e índice de agotamiento se consideró para papa una profundidad de raíces de 400 mm y su factor de agotamiento 0,35. Para el caso de la cebolla la profundidad de raíces fue de 300 mm y su factor de agotamiento 0,3; según la guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos de la FAO (FAO, 2006). Así se obtuvo los siguientes resultados de la tabla IV.

Tabla IV. Láminas de riego según las características del suelo y cultivo.

Cebolla				
Mes	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Etapa fenológica	inicial	Media	Media	Final
ln (mm/d)		6,71		
lb (mm/d)		7,06		
Tiempo de riego (min)		17,00		
Frecuencia (días)	27	3	3	4

Papa				
Mes	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Etapa fenológica	inicial	Media	Media	Final
ln (mm/d)		10,43		
lb (mm/d)		10,98		
Tiempo de riego (min)		26,40		
Frecuencia (días)	41	4	4	5

Como se puede ver la influencia del mulch es muy importante, en especial en su etapa inicial, donde la cebolla requiere una frecuencia de riego cada 27 días y la papa 41 días, lo cual implica que, bajo este análisis, después de un primer riego no se necesitaría otro más hasta el siguiente mes. También se puede ver que las láminas son más similares a las aplicadas actualmente por el productor, pero las frecuencias de riego son más amplias, de 3 a 5 días, lo cual sigue indicando un posible sobre riego en el cronograma actual.

Pero la característica definitiva que determina cuál de los dos métodos es más adecuado, es la conductividad hidráulica la cual es de 46 cm/h, lo cual indica que el suelo posee una gran infiltración y ante fertirriegos prolongados es muy posible que exista una percolación profunda, lo cual hace que la planta no necesariamente tenga más agua disponible. Ante tal situación lo recomendable es disminuir la lámina, con riegos cortos pero diarios (Calvo, 2005).

4.2 Evaluación de la eficiencia del sistema de fertirriego

4.2.1 Análisis de la uniformidad del fertirriego

Al dividirse la parcela en cuatro lotes de riego, se decidió evaluar el coeficiente de uniformidad de cada uno (ver la Ecuación 1). Los resultados se pueden observar en la Tabla V.

Tabla V. Resultados del coeficiente de uniformidad en los lotes de riego.

Lote	Coeficiente de uniformidad
A	90.15 %
B	87.81 %
C	83.63 %
D	81.39 %

Se estima que un sistema en excelentes condiciones posee un porcentaje mayor al 90 %, como en el caso del lote A y se considera de 80 %-90 % como un sistema en buenas condiciones, como en los casos de los lotes B, C y D. Los porcentajes de 70 %-80 % corresponden a aceptables, pero para riego por goteo menos del 70 % no es aceptable (Villalobos, 2001).

Como se puede ver, el lote A presenta el mayor porcentaje de uniformidad, mientras que los lotes D y C presentan los menores. Para tener un panorama más amplio de por qué sucede esto, se analizó el coeficiente de variabilidad (CV) (ver la Ecuación 14) entre los datos que se obtienen.

$$CV = \frac{\text{Desviación estandar (DE)}}{\text{Media}} \quad (14)$$

Tabla VI. Tabla de resumen estadístico del caudal en cada lote.

Lote	Caudal			
	DE(l/h)	Media(l/h)	CV	CV %
A	0,14	0,82	0.17	17.07
B	0,16	0,87	0.18	18.39
C	0,21	0,83	0.25	25.30
D	0,22	0.95	0.23	23.16

Como se observa, el lote D y C poseen los coeficientes de variabilidad más altos. Esto indica que los datos de caudal fueron menos precisos, ya que variaban más entre sí. Por lo tanto, hay menos uniformidad, lo que señala que hay goteros que liberan menos caudal en comparación con otros.

Además, si se considera que en el lote D las cintas de goteo tienen un caudal de 1,6 l/h y la media es de 0,95 l/h y en el lote C las cintas tienen un caudal de 1,1 l/h y la media es de 0,83 l/h, se evidencia que muchos de los goteros proporcionan un caudal menor al indicado por el proveedor. Esto también se puede observar en el Apéndice C. En la Figura 29 se observa en la gráfica mencionado: el lote A posee mayor precisión en sus datos, con un rango menor y pocos valores atípicos.

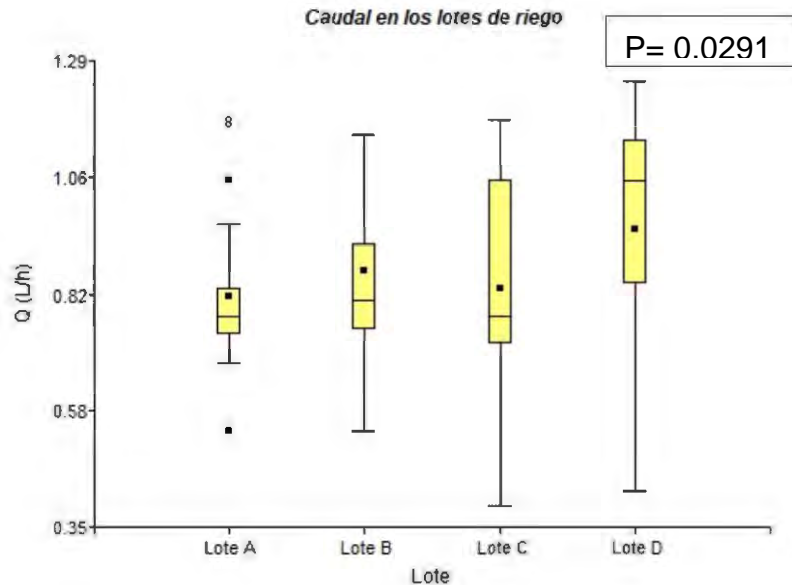


Figura 29. Gráfico de cajas para el caudal

Sin embargo, en los demás lotes los rangos son mayores, lo que indica una mayor variabilidad. En cuanto al lote B, presenta menor variabilidad que los lotes C y D, además de tener una menor cantidad de valores con bajos caudales en comparación con los mencionados.

La diferencia entre el lote C y D es que, en el D, el primer y el segundo cuartil presentaron mayor variabilidad que el tercer y cuarto cuartil, lo cual indica que al menos el 50 % de los caudales en D fueron más dispersos que en los otros lotes. Esto ocasionó una menor uniformidad de riego.

Con respecto al análisis de varianza, para el caso del caudal, con un p-valor menor que 0,05 se confirma que existen diferencias significativas entre la media de los lotes. El lote A es significativamente distinto al lote D, como se puede ver en la tabla I del Apéndice D.

Al evaluar el pH de la misma forma que el caudal es posible entender cómo se distribuía el fertilizante en las líneas de riego en los diferentes lotes. Según se observa en la Tabla VII, los coeficientes de variabilidad son muy similares entre sí, ya que el pH se mantuvo constante en la mayoría de los puntos. Sin embargo, el lote D presenta el mayor coeficiente de variabilidad, lo que indica que la distribución del fertilizante puede verse afectada por la baja uniformidad de riego.

Tabla VII. Tabla de resumen estadístico del pH en cada lote.

pH				
Lote	DE	Media	CV	CV%
A	0.15	6.07	0.02	2.47
B	0.1	6.1	0.02	1.64
C	0.1	6.01	0.02	1.66
D	0.18	6.07	0.03	2.97

En la Figura 30 se visualiza que el rango es mayor en el lote D y el más pequeño en el lote B. Sin embargo, al evaluar con el análisis de varianza, se pudo observar que con un valor p mayor que 0,05 por lo tanto no existen diferencias entre las medias del pH en los lotes (tabla I del Apéndice D).

Esto puede deberse a que los lotes en general presentaron ciertos puntos localizados donde su pH variaba, pero su promedio fue muy similar entre sí.

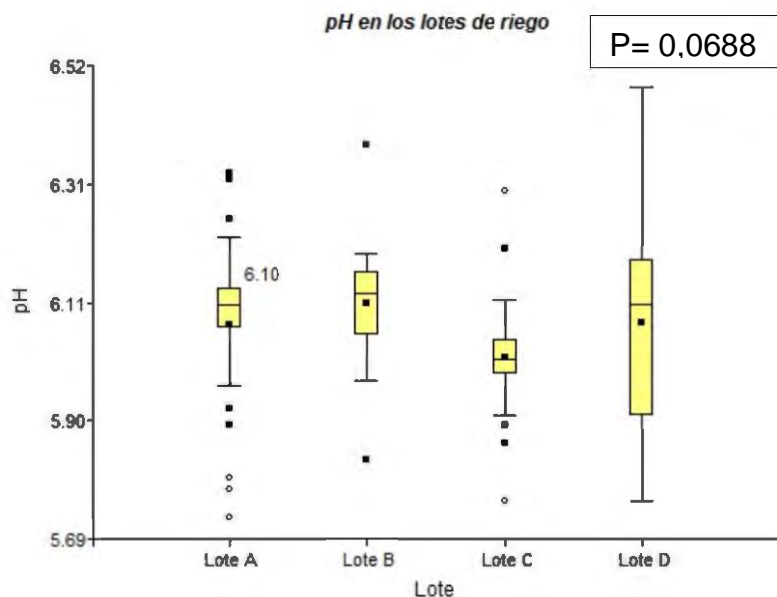


Figura 30. Gráfico de cajas para el pH

Con respecto a la conductividad eléctrica, también asociada al pH, ya que este aumenta conforme disminuye el pH, como se puede ver en el Apéndice C, pues se relaciona directamente con la concentración del fertilizante. Teóricamente, el fertilizante al disolverse en agua se disocia en cationes y aniones, por lo tanto, la conductividad eléctrica incrementa en comparación con el agua de uso doméstico, la cual posee cerca de 400 a 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que las muestras superaban incluso los 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en algunos casos. Además, el pH solía ser menor de 7, el valor usual del agua pura (Boyd, 2017).

Como se observa en la Tabla VIII, el lote D tiene el mayor porcentaje del coeficiente de variabilidad. Esto también refleja que la variabilidad en la caudal afecta la distribución del fertilizante, ya que se distribuye de forma menos proporcionada. Además, se pudo observar que la media fue mayor en el lote C y el lote A, lo cual indica mayores concentraciones de fertilizantes en estos lotes.

Tabla VIII. Tabla de resumen estadístico de la conductividad en cada lote

Conductividad eléctrica				
Lote	DE($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Media($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CV	CV%
A	493.79	1687.13	0.29	29.27
B	319.02	1485.41	0.21	21.48
C	597.91	1790.8	0.33	33.39
D	551.18	1454.69	0.38	37.89

Para el análisis de la conductividad eléctrica, con un p valor menor que 0,05 se confirma que existen diferencias significativas entre las medias de los lotes (tabla I del Apéndice D). Como se muestra en la Figura 31 el promedio varió considerablemente entre ellos.

Se observa que, aunque el lote C tiene la mayor desviación estándar y mayor rango de valores, el lote D posee un coeficiente de variabilidad mayor debido a que al menos el 50 % de las muestras de conductividad eléctrica en el lote D fueron más dispersas que en los otros lotes, lo que ocasionó una uniformidad de distribución de fertilizante más baja que en los demás lotes.

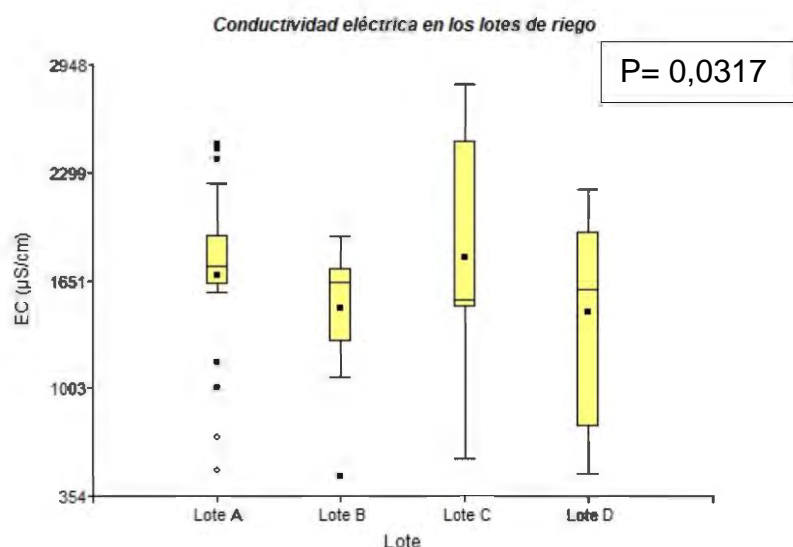


Figura 31. Gráfico de cajas para la conductividad eléctrica

Con la variación de promedio, amplios rangos y presencia de varios valores atípicos, se puede resaltar que la distribución de fertirriego no es homogénea en toda la parcela, debido a las diferencias entre los lotes. Esto puede incidir en el rendimiento del cultivo. Lo ideal es que cada lote presente promedios similares entre sí y rangos menos amplios, buscando valores más precisos en las muestras.

Al tener esto en claro, para una representación más global de la parcela en general, es posible observar en la Figura 32 cómo se han creado zonas con diferentes rangos de caudales. Esto se ha logrado mediante la interpolación de los datos que se obtienen, lo cual presenta una desviación estándar de 0,10 l/h. Esta desviación corresponde a los valores de las celdas de cada banda en el ráster.

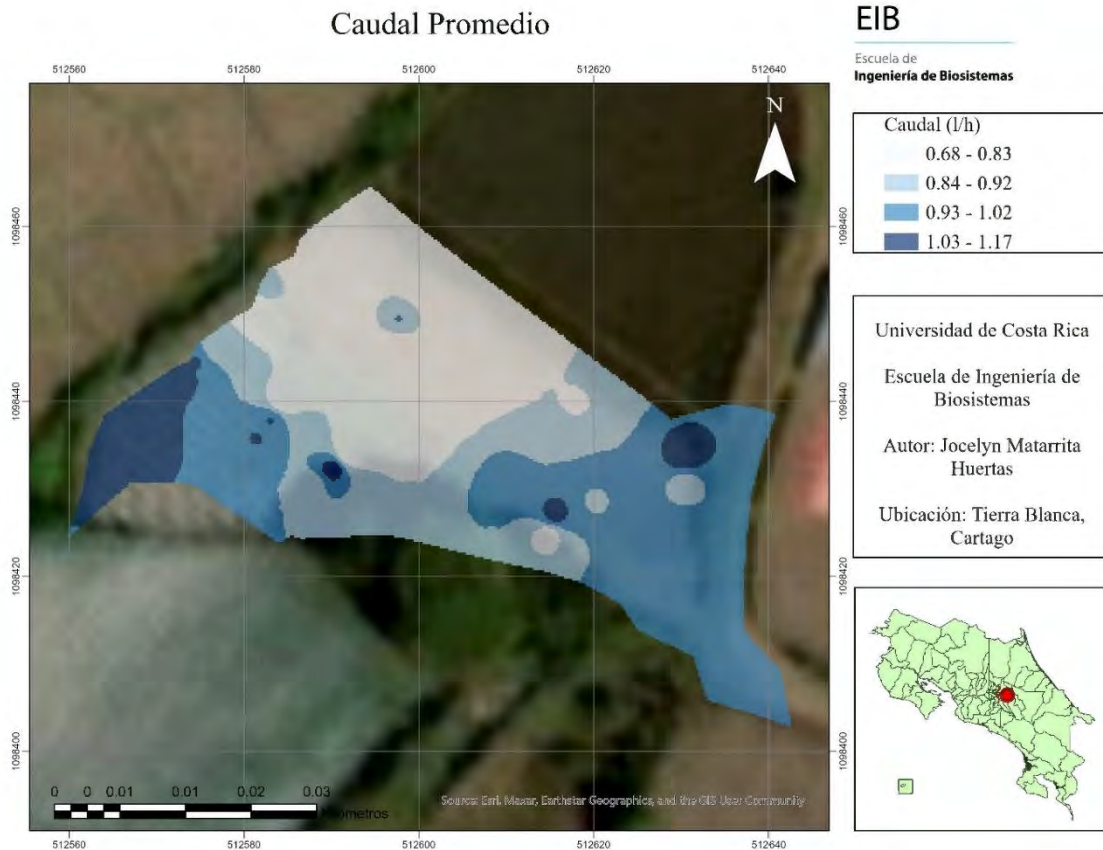


Figura 32. Mapa del caudal de riego en la parcela

Las zonas de azul oscuro tienen una aplicación de mayor caudal, que coincide con la zona más alta y baja de la parcela. En la zona baja, como se discutió, se encuentra el lote D, que presenta inconsistencia en la uniformidad en la aplicación del fertirriego, además de tener las cintas de mayor caudal, 1,6 l/h. A pesar de que el productor estima un menor tiempo para esta zona, igual recibe más cantidad de agua que las otras. Asimismo, las zonas altas evidencian recibir altos caudales, lo cual puede ser efecto de las prácticas de riego, ya que se prolonga el tiempo en estas zonas, con el fin de mejorar su producción, con la justificación de que en estas zonas los cultivos llevan un ritmo de crecimiento más lento, según asegura el productor.

Además, se puede observar que la parte inferior derecha de la parcela tiene muy poco caudal. Durante la recolección de muestras, se pudo evidenciar que la zona tenía varias obstrucciones en los goteros, asimismo, de diversas fugas, como se muestra en la Figura 33.

Lo anterior puede ser un indicio de que la zona puede verse más afectada por factores de mantenimiento del sistema de riego, más que por las condiciones de elevación o la presión operativa. Se observa que, en las zonas altas, con la misma presión de trabajo, llega más agua que en la zona baja.



Figura 33. Fugas encontradas en las líneas de riego

En cuanto al pH, las zonas donde se puede observar mayor cantidad de caudal son aquellas que tienen un pH más elevado, como se muestra en la Figura 34. De igual forma, en esas mismas zonas, la conductividad eléctrica es menor, como se puede apreciar en la Figura 35. Estos fenómenos se deben a que, a medida que aumenta la concentración de fertilizante, el pH del agua tiende a disminuir y la conductividad eléctrica tiende a aumentar. Por lo tanto, las zonas con mayor caudal presentan una distribución de fertilizante diferente, es decir, una concentración más diluida que en el resto de las zonas.



Figura 34. Mapa de pH del riego en la parcela

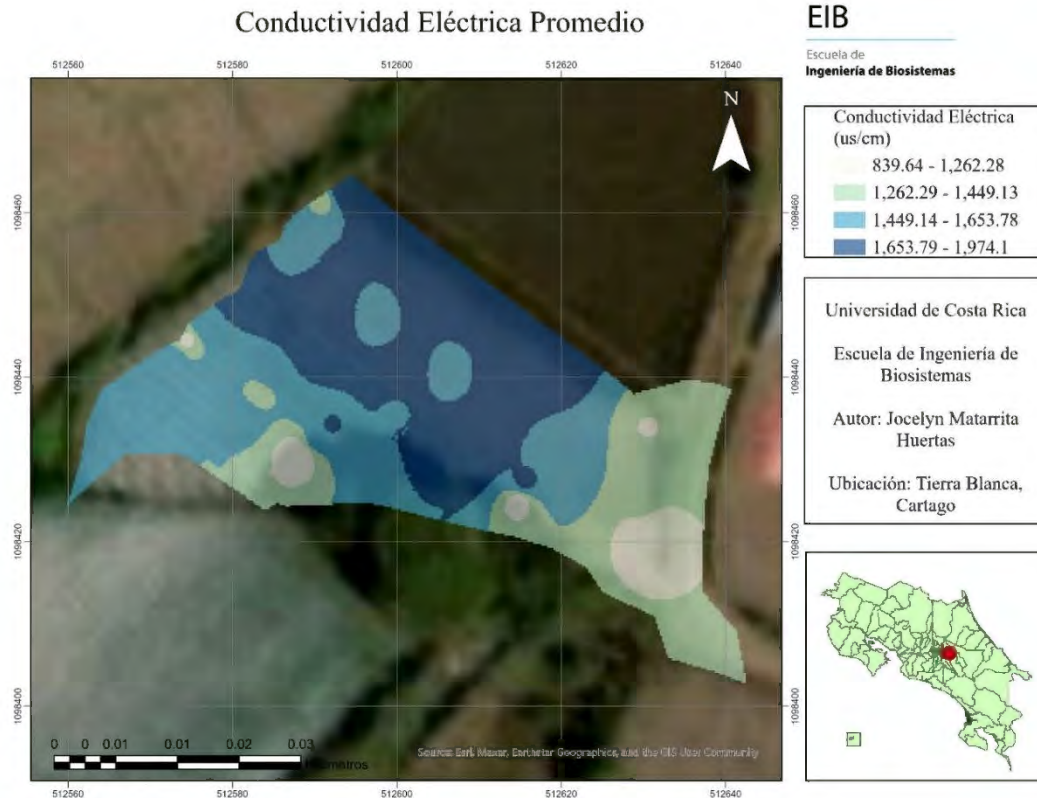


Figura 35. Mapa de conductividad eléctrica en la parcela

En cambio, se puede observar que las zonas intermedias de la parcela tenían un pH más bajo y una mayor EC. Aunque no se valoró dentro de los alcances de este estudio, se puede evidenciar la falta de uniformidad en la parcela y cómo esto puede afectar la producción. La interpolación del pH se realizó con una desviación estándar de 0,05 y de CE con 176,20 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

4.2.2 Evaluación de los efectos del riego en la parcela

Durante la semana de evaluación se analizaron los tres días con aplicación riego y los tres días sin aplicación de riego utilizando los sensores elaborados (Apéndice E). Se observó que la humedad disminuía en los días sin aplicación de riego, aunque no de manera uniforme en todos los puntos donde se colocaron los sensores. Cuando se aplicaba fertirriego, el coeficiente de variabilidad era considerablemente menor que en los días sin aplicación de riego, como se muestra en la Tabla IX.

Tabla IX. Tabla de resumen estadístico del porcentaje de humedad de los 4 sensores en cada punto de medición clasificados en la metodología.

Condición	Humedad			
	DE(%)	Media(%)	CV	CV%
Con aplicación de riego	4.51	27.1	0.17	16.64
Sin aplicación de riego	11.02	18.14	0.61	60.75

Como se ilustra en la Figura 36, los rangos en los días sin aplicación de riego eran más amplios, a excepción del punto B, que se encontraba en la parte inferior de la parcela. En cambio, en los días con aplicación de riego, el punto D presentó el menor rango, presentando niveles de humedad más homogéneos. Su ubicación es el lugar de menor elevación de la parcela.

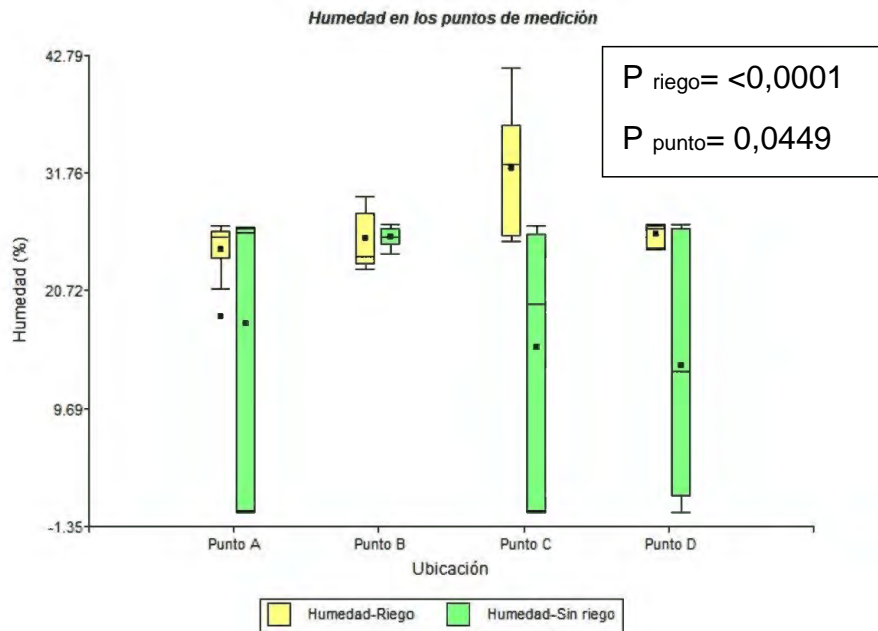


Figura 36. Gráfico de cajas para el porcentaje de humedad

Con respecto al análisis de varianza de los valores de humedad, se observa una diferencia significativa entre los días de aplicación y sin aplicación riego, así como entre los puntos de medición, con un p-valor menor que 0,05 (tabla II, Apéndice D).

Además, se evidencia que la zona cercana al punto B, en los días sin aplicación riego, presenta una humedad promedio mayor que el resto de la parcela. En cambio, en los días con aplicación de riego, la zona intermedia donde se encontraba el punto C muestra los mayores niveles de humedad, como se puede evidenciar también en la Figura 37. En los días de riego, el punto C, la zona intermedia presenta los valores promedio más altos a pesar de variar más. De esta forma, se observó que, durante el riego, el punto C es el de mayores valores, pero el menos homogéneo, sin embargo, en los días sin aplicación riego, el punto B presenta mayor humedad y menos variabilidad (ver la Figura 38).

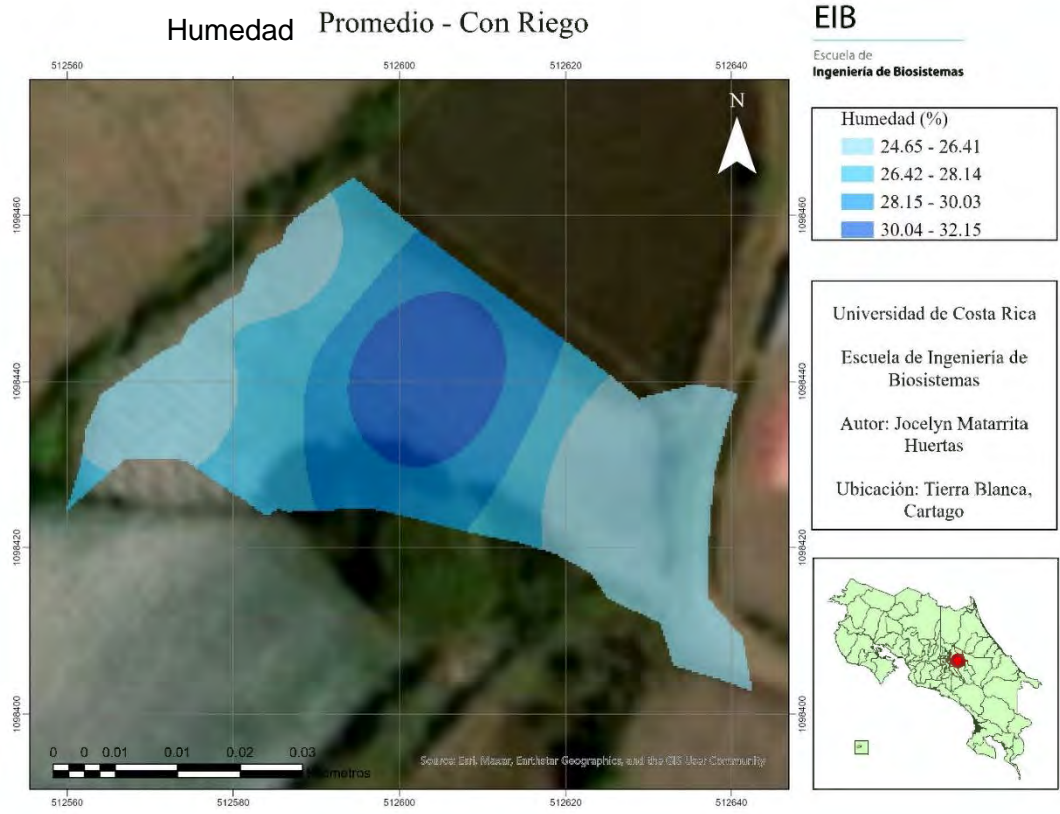


Figura 37. Mapa de humedad promedio con aplicación de riego

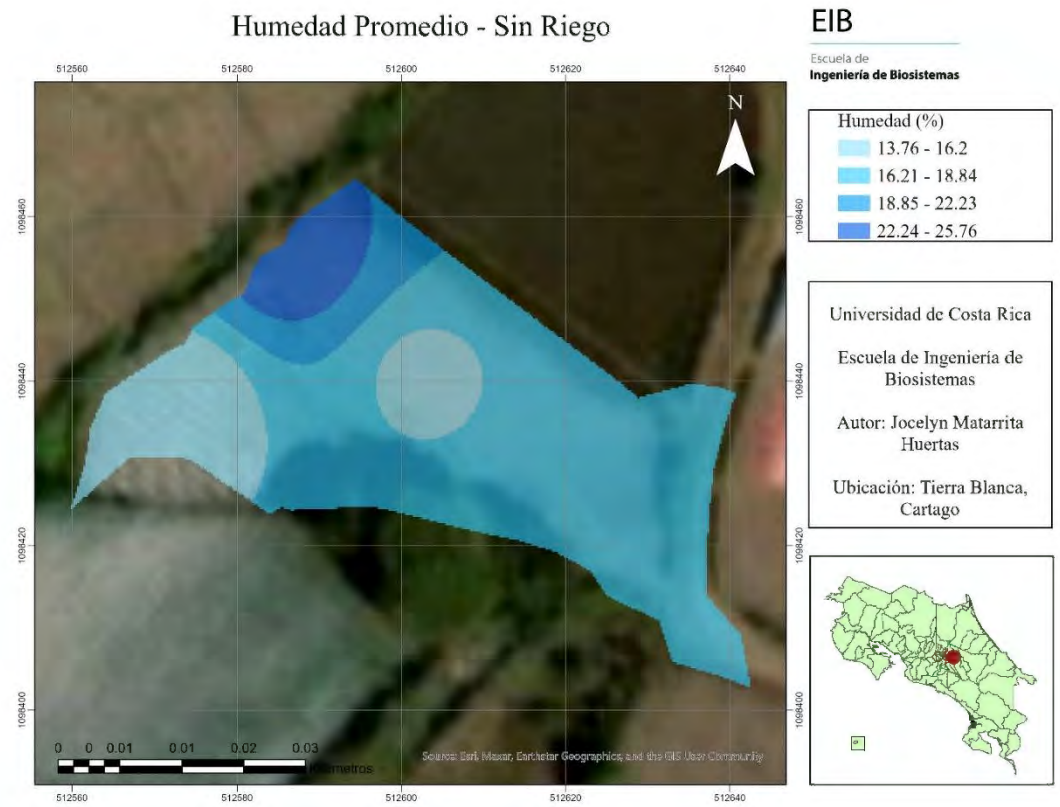


Figura 38. Mapa de humedad promedio sin aplicación de riego

Como se mencionó, la zona intermedia de la parcela posee mayor concentración de humedad y los sectores más altos y bajos presentan valores menores. Esto refleja la falta de uniformidad que presenta el riego, ya sea por mantenimiento de las líneas de goteo obstruidas o por la diferencia de elevación que se mencionó.

En la Figura 38 se puede observar lo discutido en la Figura 36. Los días sin aplicación de riego muestran una mayor retención de humedad en la zona baja de la parcela. Sin embargo, también se evidencia que en su mayoría se presenta un porcentaje intermedio de humedad homogéneo, que va desde el 16.21 % al 18.84 %. La interpolación de humedad de los días con aplicación riego muestra una desviación estándar de 1.97 %, mientras que para los días sin aplicación riego es de 2.46 %.

En el caso de la tensión, en los días con aplicación riego, la media era menor con respecto a los días sin aplicación de riego, aunque sus valores siguen siendo los esperados para el tipo de suelo. Esto evidencia que, a mayor humedad, las plantas ejercen menor tensión matricial para obtener agua, ya que poseen mayor cantidad disponible, a diferencia de los días sin aplicación de riego (Tabla X). Sin embargo, los días con aplicación riego presentaron un coeficiente de variabilidad mayor, lo cual puede deberse a que la humedad no era homogénea en esos días, lo que hacía que hubiera menos humedad disponible en ciertas zonas.

Tabla X. Tabla de resumen estadístico de la tensión en cada punto de medición.

Condición	Tensión			
	DE(kPa)	Media(kPa)	CV	CV %
Con aplicación de riego	3.87	10.39	0.37	37.25
Sin aplicación de riego	1.63	11.13	0.15	14.65

En la Figura 39 se observa que en los días con aplicación riego y sin aplicación riego, el punto D presentó los mayores valores de tensión. Esto también se puede apreciar en la Figura 40 ya que cerca de ese punto de medición siempre se encontraba la zona de mayor tensión. En esta zona, las plantas poseen menos agua disponible en comparación con el resto de la finca, a pesar de ser la zona de menor elevación. Sin embargo, como se puede ver en la Figura 41 la zona del punto D todo el tiempo presentó bajos niveles de humedad, sin importar la condición.

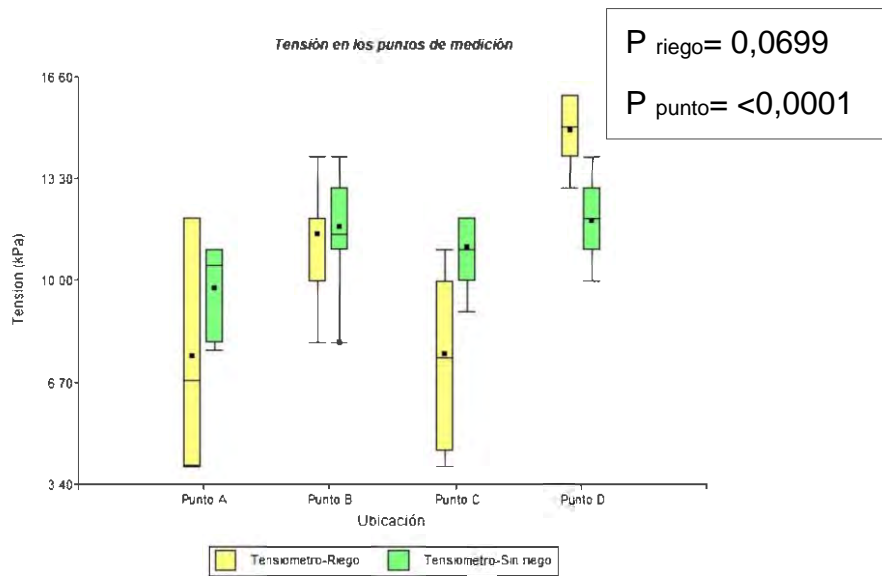


Figura 39. Gráfico de cajas para la tensión matricial

En cuanto al análisis de varianza para la tensión, con un p-valor mayor que 0,05, no existen diferencias significativas entre los días con y sin aplicación de riego. Sin embargo, sí existen diferencias significativas con respecto a los puntos de medición (Tabla II, Apéndice D).

Otro comportamiento que se evidencia en los mapas de tensión es que, en los días de aplicación de riego, la tensión disminuye. Como se espera, su área aumenta, siendo esta zona de color amarillo la de mayor extensión. Cabe resaltar que en la zona baja se encontraba el canal de drenaje de la parcela, lo cual podía influir en la cantidad de agua disponible en estas zonas.

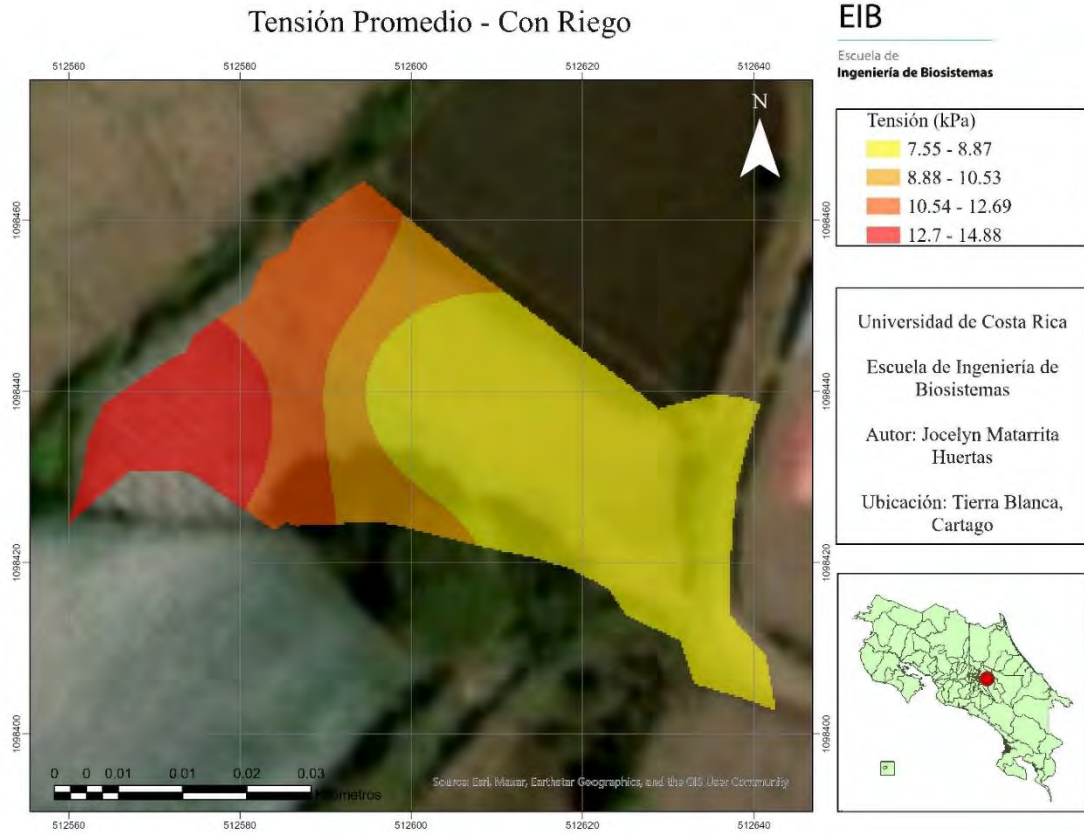


Figura 40. Mapa de tensión promedio con aplicación de riego

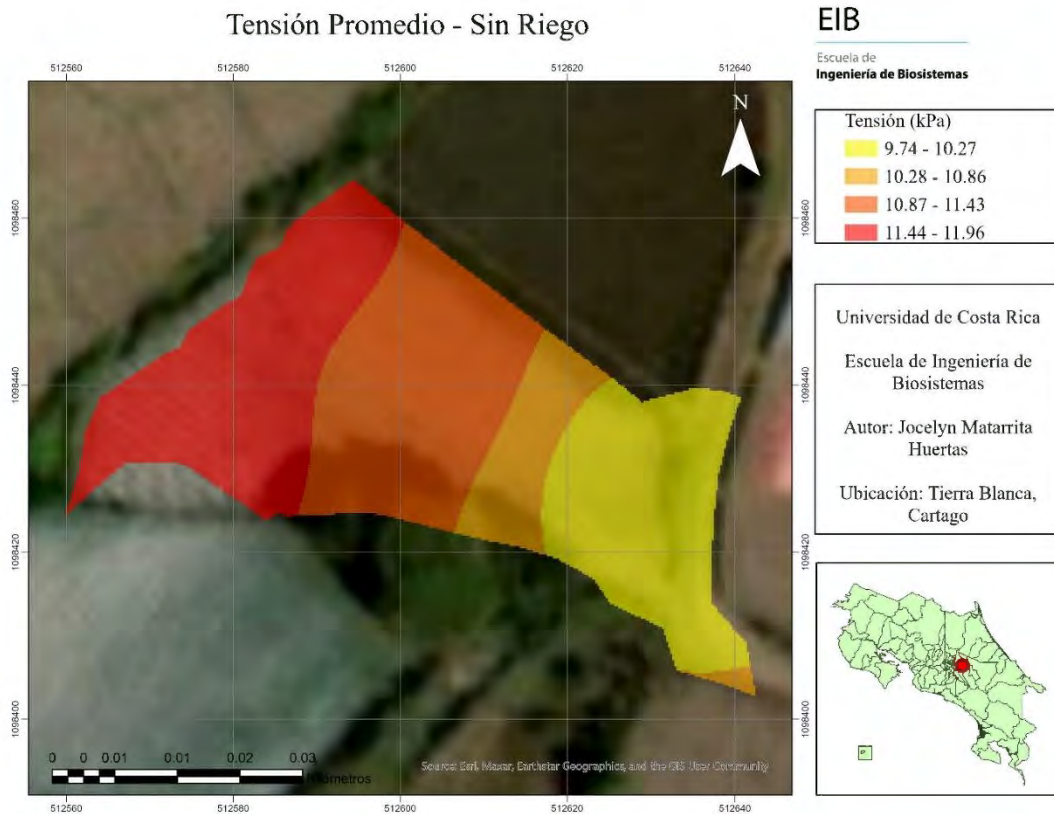


Figura 41. Mapa de tensión promedio sin aplicación de

La principal diferencia entre los días con y sin aplicación de riego es que, en los días donde se riega, en la Figura 40 se observa una zona más amplia con valores bajos de tensión, mientras que, en los días sin aplicación de riego, Figura 41, esta zona solo disminuye en la parte superior. Esto se debe a que los días con aplicación riego presentan un aumento de agua disponible para las plantas. A pesar de lo anterior, la zona inferior siempre presenta los mayores valores de tensión, independientemente de la situación evaluada.

Este comportamiento puede deberse a la cercanía que tiene la zona con los drenajes de la finca, los cuales se encuentran en la parte inferior. Además, es importante destacar que la parcela presentaba inestabilidad en el terreno en esta misma zona inferior, evidenciándose pérdida de suelo debido a deslaves, como se muestra en la Figura 42. Las capas ráster presentaron una desviación estándar de 2,21 kPa para los días con aplicación riego y de 0,64 kPa en los días sin aplicación de riego.



Figura 42. Evidencia de deslaves de terreno en la zona inferior de la parcela

Para la temperatura del suelo, la media de los días de aplicación de riego fue mayor, pero esto puede deberse a que su porcentaje de variabilidad es el doble en comparación con los días sin aplicación de riego, como se indica en la Tabla XI. Por lo tanto, pudo verse influenciado directamente por el clima y la radiación solar de ese día.

Tabla XI. Tabla de resumen estadístico de la temperatura en cada punto de medición.

Condición	Temperatura			
	DE(°C)	Media(°C)	CV	%
Con aplicación de riego	3.68	15.92	0.23	23.12
Sin aplicación de riego	1.51	12.59	0.12	11.99

En la Figura 43 se demuestra lo mencionado: los días con aplicación riego presentan un mayor promedio de 3 días y rango en la temperatura en comparación con los días sin aplicación. En el caso del análisis de varianza de la temperatura, se comprueba que existen diferencias significativas entre los días con aplicación y sin aplicación de riego, así como entre los puntos medidos, como se observa en la tabla II del Apéndice D. El p-valor es menor que 0,05 en ambos casos.

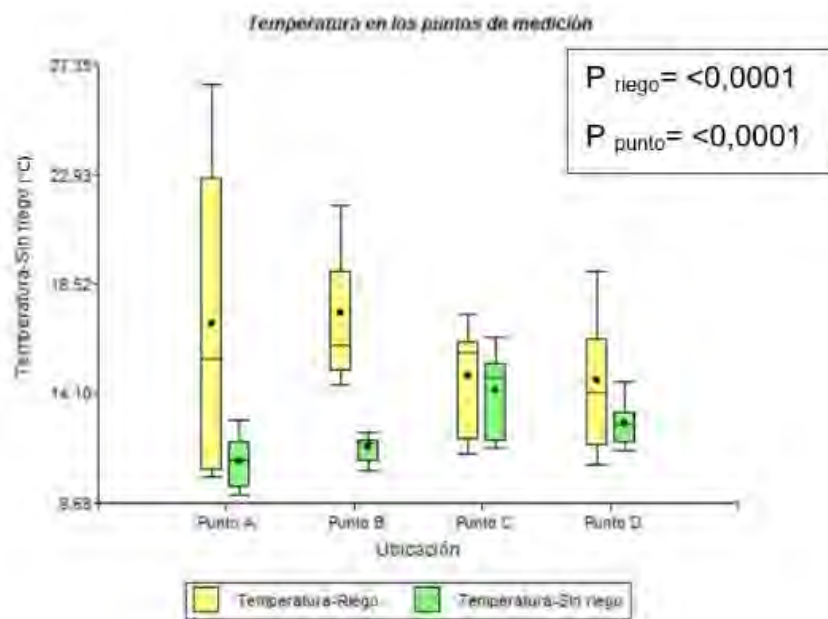


Figura 43. Gráfico de cajas para la temperatura del suelo

No obstante, al analizar los mapas donde se formaron las zonas, se puede observar en los mapas de temperatura (ver la Figura 44) que las zonas de temperatura coinciden con las zonas de humedad. En las áreas con mayor humedad, la temperatura es menor, mientras que, en las áreas con menor humedad, la temperatura es mayor. Este hallazgo respalda lo observado en el caso de los días con aplicación de riego.

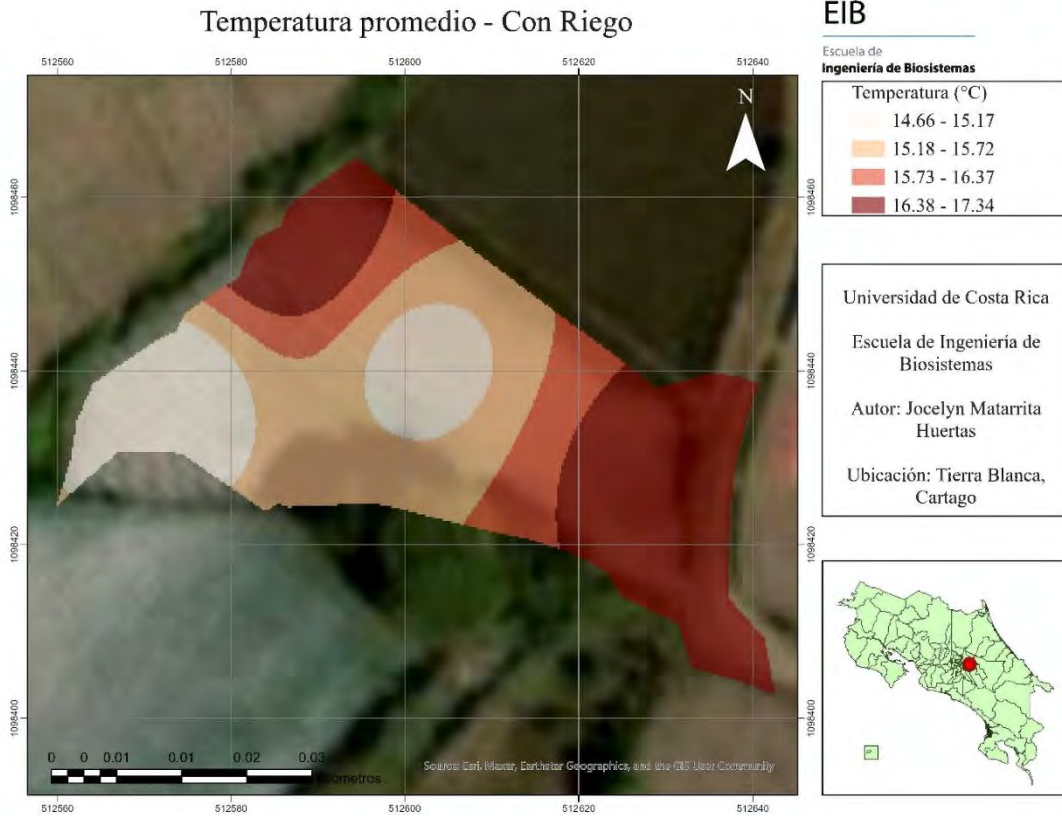


Figura 44. Mapa de temperatura promedio sin aplicación de riego

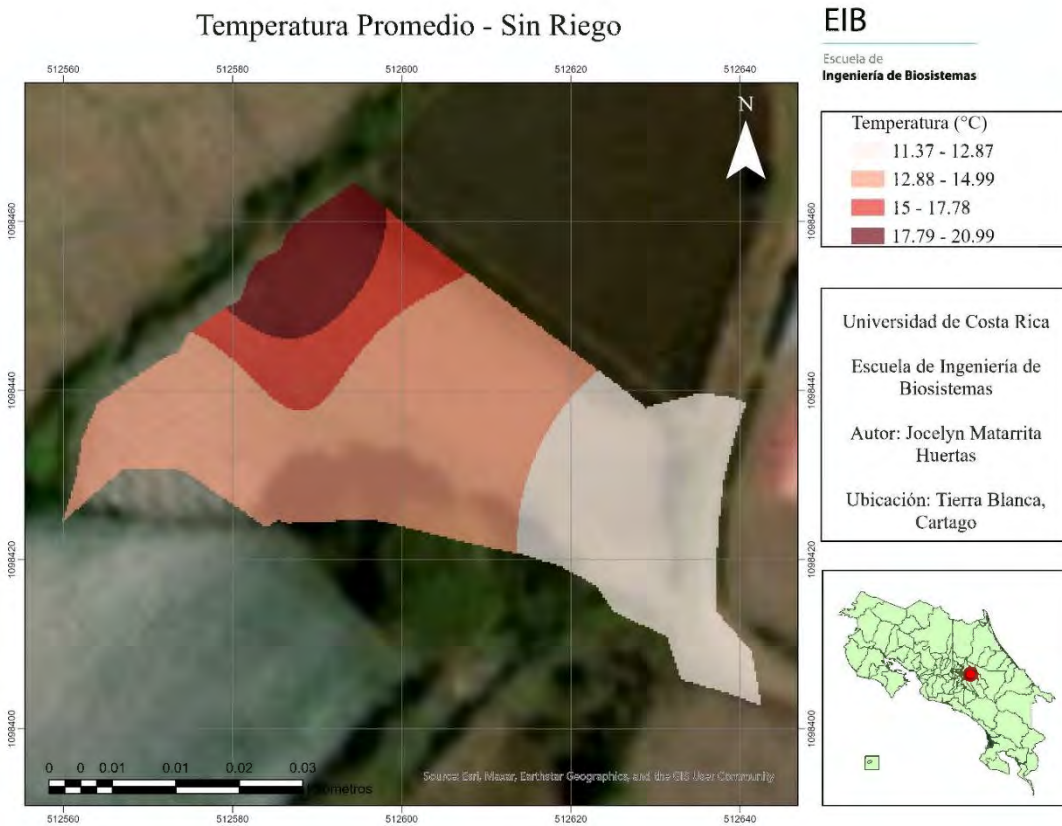


Figura 45. Mapa de temperatura promedio sin aplicación de riego

Con respecto a los días sin aplicación riego, se demuestra que las zonas de temperatura se comportan de forma diferente, ya que no se tiene la influencia del agua en el suelo. Por lo tanto, se observa una zona de mayor temperatura en la parte inferior en comparación con la superior, la cual puede deberse a la incidencia del sol sobre el terreno. La capa ráster para los días sin aplicación de riego es de 2,17 °C y en los días con aplicación de riego es de 0,71 °C.

4.3 Propuesta de mejora para la parcela de estudio y su sistema de fertirriego

La propuesta de mejora se articula en cuatro segmentos fundamentales, como se indica en la Figura 46, cada uno aborda un aspecto relevante para la optimización de la producción y uso de recursos por parte del productor, basados en la caracterización y evaluación realizada en la parcela de estudio.

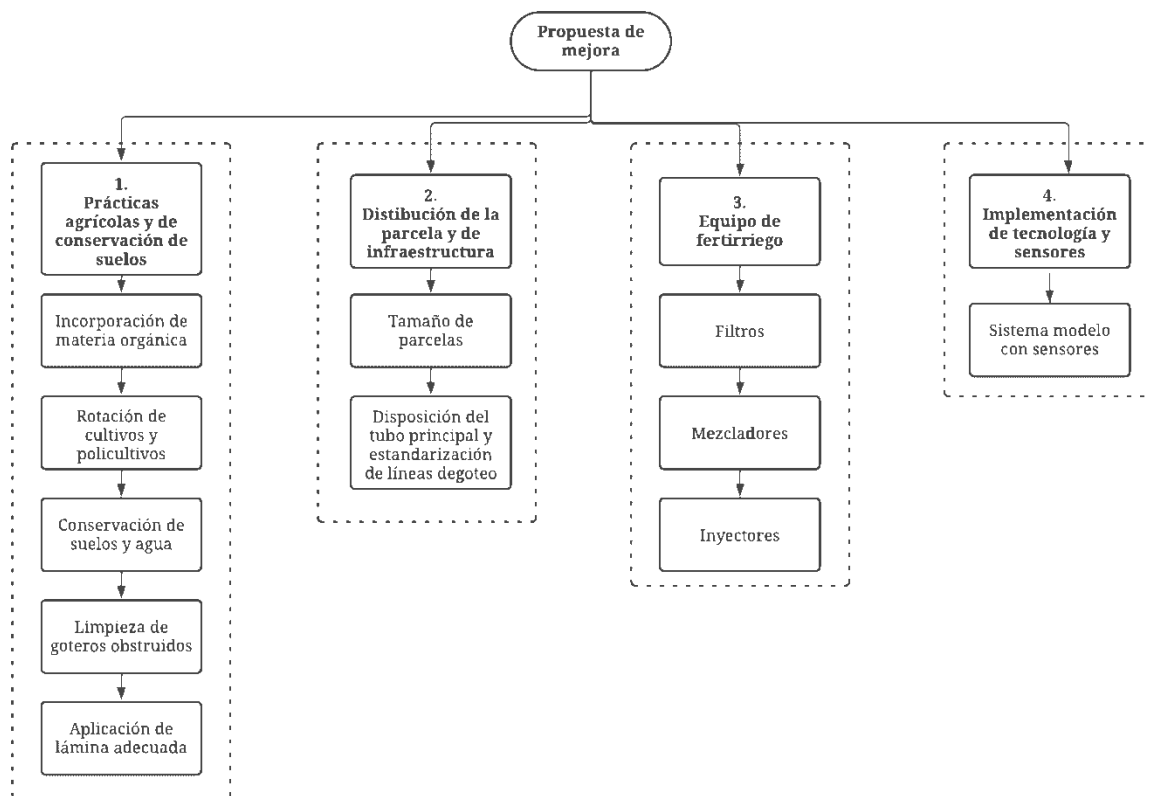


Figura 46. Esquema de la propuesta de mejora

En el primer bloque de esta propuesta, basándose en lo determinado en la exploración topográfica y análisis de suelo, se abordan buenas prácticas agrícolas, para así mantener la sostenibilidad del suelo, donde lo recomendado son las prácticas de conservación, enfocándose en mejorar la composición de este. Debido a los resultados del análisis químico y físico del suelo, donde se denota una densidad aparente alta y un bajo índice de materia orgánica según la norma del CIA, se recomienda la incorporación de esta, además de la rotación de cultivos y la implementación de policultivos lo cual no solo mejorara el estado del suelo, sino que le prepara adecuadamente para cultivos intensivos.

Además, basándose en lo determinado en las pruebas de uniformidad se resalta un componente alto de variabilidad a lo largo de parcela en cuanto a distribución de fertilizante y agua. Por lo tanto, también se contempla dentro de las prácticas agrícolas a proponer en el manejo de riego,

la limpieza de goteros obstruidos y prácticas preventivas para evitar estos problemas. Asimismo, se sugiere un acondicionamiento sobre la lámina aplicada actualmente, ya que se incurre en excesos de riego al compararse con lo teóricamente esperado. Lo cual optimizaría el uso de recursos como fertilizante, energía y agua.

En el segundo bloque de recomendaciones se abordan los aspectos de distribución de la parcela y su infraestructura de riego. Como se evidenció, es necesaria una distribución más homogénea de las parcelas de riego y una nueva disposición del tubo principal, acompañado de una estandarización de las líneas de riego. En el tercer bloque, se abordan las sugerencias del equipo de fertirriego, como los filtros, mezcladores e inyectores, buscando equipos que se adapten a las condiciones de la parcela y a la realidad del productor con el fin de optimizar el proceso de fertirrigación.

Por último, en el cuarto bloque en base a los resultados obtenidos con la implementación de los sensores para la evaluación de la parcela, se propone la implementación de aplicaciones tecnológicas y diversos sensores, en busca de la optimización de la producción y adaptación a los retos actuales que presentan los productores. Esta propuesta de mejora representa un modelo de agricultura tecnológica integral de sostenibilidad agrícola, basada en la investigación y consulta a expertos en el tema. Como en este último caso con un representante de la empresa Netafim en Costa Rica, quien maneja las demandas y las ofertas actuales en el mercado.

4.3.1 Prácticas agrícolas y de conservación de suelos

4.3.1.1 Incorporación de materia orgánica

Para solucionar la escasez de materia orgánica en el suelo se recomienda incorporarla mediante rastrojos o compost. Esto mejora, tanto la estructura como la fertilidad del suelo, lo que evita que pierda sus características beneficiosas con el tiempo. Al incorporar rastrojos de cultivos, es importante destacar la calidad más que la cantidad de rastrojo que se utiliza. Se busca que tenga una buena relación C:N (carbono/nitrógeno), lo cual es beneficioso para la descomposición de los rastrojos (Martínez, 2021).

Esto es importante, ya que, si los rastrojos son bajos en N, los microorganismos consumirían la mayoría, quedando muy poco restante para el suelo. Además, la fermentación puede ser muy lenta y el C se puede perder como dióxido de carbono (CO₂). No obstante, de igual manera, si las concentraciones de N son muy altas, estas pueden transformarse en amoníaco (NH₃) (Martínez, 2021).

El rastrojo de maíz es muy utilizado, pero su relación carbono es de 60:1, una relación de C muy alta. En cambio, el follaje verde de leguminosas tiene relaciones de 15:1 (Martínez, 2021), lo que indica que puede reducirse el uso de fertilizantes nitrogenados. De esta forma, no solo se mejora la estructura del suelo y su composición química, sino también los costos de producción.

Se propone utilizar diversos abonos que son producto del compostaje y de técnicas de biorremediación. En estos procesos, se suelen fijar diversos minerales y compuestos orgánicos que son de gran utilidad para mejorar las condiciones del suelo. Por ejemplo, se pueden usar lodos residuales de algunas plantas de tratamiento que tienen altas cantidades de nitrógeno y

carbono. Estos lodos, debidamente procesados, son una rica fuente de nutrientes (Rodríguez, 2013).

4.3.1.2 Rotación de cultivos y policultivo

Aunque se conoce que el productor rota y practica el policultivo, es importante recomendar ciertas acciones alrededor de este tema. Cada planta exuda fotosintatos en el suelo, los cuales afectan la biodiversidad microbiana de este, que influye en la salud de la planta y el estado del suelo. Al no rotar el cultivo, se puede dar la proliferación de malezas, plagas y deterioro del suelo (NCAT, 2015).

Dentro de las recomendaciones dadas por el NCAT, se sugiere no cultivar dos ciclos seguidos de especies cercanamente relacionadas. Además, se recomienda implementar cultivos de raíces profundas y utilizar cultivos de periodo más largos en terrenos inclinados. En caso de cultivar especies altas fijadoras de N, el siguiente ciclo debe incluir un cultivo con alta demanda de N. Asimismo, es importante implementar la mezcla de cultivos, agrupándolos por bloques según familias, necesidades nutricionales y prácticas agrícolas similares.

En este caso, el productor tiene cebolla, puede cultivar en conjunto con la misma otros cultivos que pertenece a la familia *Allium*, como lo es el ajo y el cebollín. En cuanto a las solanáceas, relacionadas a la papa, se encuentra el tomate, las berenjenas y el chile. Asimismo, se puede considerar la zanahoria, que pertenece a la familia *Apiaceae*, ya en otras ocasiones el productor ha cultivado este vegetal y es común en la zona. En esta familia de la zanahoria también se encuentra el apio, el cilantro y el perejil, los cuales también podrían cultivarse en conjunto debido a la similitud en cuanto a requerimientos y condiciones (NCAT, 2015).

Además, es prudente implementar cultivos de cobertura como abonos verdes, como se puede ver en la Figura 47. En estos cultivos se busca evitar la erosión del suelo, que está muy presente en la zona y mejorar la retención de humedad y los componentes químicos del suelo. Entre estos cultivos se encuentran las leguminosas, que pueden dar beneficios económicos, ya que muchas tienen la posibilidad de cosechar y vender. Asimismo, tienen la capacidad natural de establecer asociaciones con las bacterias del género *Rhizobium*, las cuales pueden fijar nitrógeno de la atmósfera y optimizar la fertilidad del suelo (Instituto Meteorológico Nacional [IMN], 2020).



Figura 47. Ejemplo de coberturas con abonos verdes (IMN, 2020)

4.3.1.2 Conservación de suelos y agua

Según el IICA (2012), los terrenos con menos del 50 % de pendiente pueden utilizarse con fines agrícolas mediante la implementación de obras de conservación de suelos y agua. La parcela presenta pendientes variadas, pero en general tiene pendientes inferiores al 30 %, lo cual la hace adecuada para el uso de barreras vivas o muertas, acequias y diques, de acuerdo con el caso.

En el caso de estudio, se considera una buena opción utilizar barreras vivas, especialmente en las zonas de menor elevación de la parcela, como se puede ver en el MED, en su contorno. En esta área se evidencia una pérdida de suelo hacia un canal que funciona como drenaje de las parcelas en la zona. Además, se pudo observar que la zona de la parcela cercanas a este sector, punto D donde se colocaron los sensores, presentaban los mayores valores de tensión matricial y los menores de humedad. Esto indica problemas de retención de humedad, incluso en los días con riego.

Las barreras vivas son hileras de plantas cultivadas en las curvas de nivel, puede usarse madero negro, valeriana, vetiver, caña de azúcar, zacate limón, entre otros. Para elevaciones de más de 2000 m. s. n. m., se recomienda zacate limón. Esto ayuda a reducir la velocidad del agua que viene por la ladera y actúa, a la vez, como un rompedor, lo que reduce la erosión hídrica y eólica. Además, las barreras vivas tienen la posibilidad de captar residuos por escurrimiento. Para esto, se pueden colocar rastrojos en las mismas (IICA, 2012), como se ilustra en la Figura 48.



Figura 48. Ejemplo de barrera viva para la parcela

4.3.1.3 Limpieza de goteros obstruidos

Como se pudo evidenciar, una de las razones de la falta de uniformidad en el riego es la obstrucción de los goteros. No obstante, se requeriría un análisis más profundo para evaluar si se debe a sedimentos provenientes del reservorio o a reacciones que hacen que se sedimenten sólidos insolubles en los goteros. En ambos casos, se considera pertinente implementar la limpieza de las líneas de goteo como mantenimiento y así evitar estos eventos que pueden afectar varias zonas.

Uno de los casos es la obstrucción de los goteros por algas. La fuente principal de agua es un reservorio sin cobertura, en el cual se puede generar la producción de estas. Si se evidencia una proliferación de algas, se recomienda el peróxido de hidrógeno en dosis cercanas a 500 ppm. En caso de la sedimentación de calcio y sulfato producto de los fertilizantes, los cuales producen sarro, se sugiere aplicar ácido sulfúrico. Sin embargo, se necesita manejarlo con precaución, en concentraciones no mayores al 10 %, para no dañar los componentes hidráulicos del riego por goteo (Guy, 2021).

Es importante destacar la importancia de realizar prácticas preventivas para evitar estos problemas. Por ejemplo, se recomienda llevar a cabo el lavado del sistema después de cada fertirriego y utilizar soluciones químicas de limpieza de forma frecuente. Para el lavado del sistema, se sugiere aumentar la presión dentro de la tubería para incrementar la velocidad del agua y permitir que esta pueda retirar el sedimento en las paredes y los goteros. Según el manual de Netafim para el equipo recomendado, cinta de goteo modelo 16150, se aconseja una presión de lavado de 2,5 bar (2015).

4.3.1.4 Aplicación de lámina de agua adecuada y efecto en el uso de recursos

En muchas ocasiones existe un exceso de riego debido al entendido de que, cuanto mayor sea la cantidad aplicada, mayor es el rendimiento. Pero la aplicación de láminas altas de riego puede tener el efecto contrario. Ante el problema global de escasez de agua y con el objetivo de optimizar su consumo, se recomienda disminuir el tiempo actual de riego.

Como se pudo evidenciar en las tablas II, III y IV, la lámina actual aplicada está sobredimensionada y mucha del agua aplicada puede estar perdiéndose por percolación, incluyendo los fertilizantes. Además, después de analizar la característica del suelo, lo recomendado son riegos diarios, y bajo el supuesto del uso de la línea de goteo de 1 l/h se puede calcular la intensidad de aplicación mediante la ecuación 12 y verificar si es viable el riego diario (Calvo, 2005). Para esto se consideró los espacios entre los goteros y distancia entre líneas de goteo de 20 cm en ambos casos, además de existir un solo gotero por planta. Dando por resultado una intensidad de aplicación de 25 mm/h, lo cual es menor que la conductividad hidráulica y por lo tanto no debería existir una saturación del suelo en exceso o escorrentía.

Pero como se mencionó anteriormente, la conductividad hidráulica es muy alta, por lo tanto, lo recomendado son riegos diarios pero cortos. En base a esto se usan las láminas correspondientes a la tabla II, donde lo que se busca es satisfacer la demanda del cultivo en base a su ET_C correspondiente. Con estos datos se calculó el tiempo de riego con la ecuación 11, obteniendo los siguientes resultados en la tabla XII.

Tabla XII. Laminas propuestas y tiempos de riego.

Cebolla				
Mes	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Etapas fenológica	inicial	Media	Media	Final
lb (mm/d)	0,28	2,42	2,72	2,11
Tiempo de riego (min)	0,68	5,81	6,53	5,05

Papa				
Mes	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Etapas fenológica	inicial	Media	Media	Final
lb (mm/d)	0,28	2,65	2,98	2,11
Tiempo de riego (min)	0,68	6,36	7,15	5,05

Es importante resaltar que en la etapa inicial el tiempo de riego es mínimo, lo cual operacionalmente resulta inconveniente a menos que se aplique en un sistema automatizado y se evalúen sus beneficios netos sobre el cultivo. Por lo tanto es recomendable si el sistema no está automatizado, que se hagan riegos de 5 min pero semanales, bajo la premisa que el mulch en la etapa fenológica inicial, disminuye su evapotranspiración y el cultivo aun no presenta mayor demanda hídrica (FAO, 2006).

Para los demás meses, los riegos se estiman al redor de los 5 y 7 minutos, lo cual presenta una gran reducción en los tiempos de riego en comparación a los originales, como se puede ver en la tabla XIII. Es importante recalcar que para el mes de febrero la demanda es mayor debido a su ET_C y por lo tanto las láminas deben ser mayores.

Tabla XIII. Porcentaje de reducción de aplicación de agua.

Cebolla				
Mes	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Etapas fenológica	inicial	Media	Media	Final
Porcentaje de reducción (%)	96,40	69,46	65,66	73,41

Papa				
Mes	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Etapas fenológica	inicial	Media	Media	Final
Porcentaje de reducción (%)	97,00	72,11	68,64	77,83

Como se puede ver la reducción de agua aplicada en comparación con la propuesta es considerable, de más del 50% en cada mes, de esta forma si se aplica este cronograma se tiene una reducción de uso de agua en esta actividad del 65% al 97%, siendo las etapas iniciales donde se podría usar de forma más eficientemente el agua, lo cual tiene un impacto positivo en el manejo de recursos para producir. Además, también se puede evaluar la cantidad de fertilizante aplicado, y considerar una disminución en su dosis ya que se disminuye el volumen de agua aplicada, esto con ayuda de un especialista en el tema. Pero ante riegos localizados y menor tiempo de riego, no solo se evita la percolación profunda de agua sino también de fertilizantes por lo tanto el uso de este se verá optimizado.

En base a esto también se puede evaluar el consumo energético que la bomba hacía en un inicio (ecuación 13) con el cronograma original en contraste con su uso en el cronograma propuesto, como se puede ver en la tabla XIV, donde se calcula el consumo mensual en kWh. En el caso de cronograma nuevo como los tiempos de riego cambian por etapa fenológica, se utilizó un promedio de tiempo de 6 minutos para su cálculo, como lo sería para el mes de enero. En base a eso también se contempló que se riegan los lotes uno por uno.

Tabla XIV. Consumo mensual de la bomba según el cronograma.

Escenario	Actual	Propuesto
Potencia (kW)		0,93
Tiempo por día (min)	80	24
Días al mes	12	30
Horas al mes	16	12
Consumo mensual (kWh)	14,90	11,17

Como se puede ver, a pesar de que el riego tiene una mayor frecuencia, el disminuir el tiempo de aplicación, también disminuye el tiempo de uso de la bomba, por lo tanto, con este nuevo cronograma no solo influye en un ahorro del manejo de recursos como el agua y el fertilizante, sino también el consumo energético.

4.3.2 Distribución de la parcela y de infraestructura

4.3.2.1 Tamaño de parcelas

En los diseños de riego siempre se busca una distribución lo más homogénea posible de las áreas de riego, con el fin de aplicar cantidades similares de agua y fertilizantes. Como se pudo ver, la parcela está dividida en 4 lotes, de los cuales 3 estaban entre los 335-395 m², pero el último lote poseía mayor área, 520 m². Además, el lote presentaba más irregularidades en el riego, mayor variabilidad de pH y conductividad eléctrica y, a la vez, el menor porcentaje de uniformidad de riego.

Al tomar en cuenta que el área cultivable es de aproximadamente 1512 m², se pueden estimar lotes de 370 a 380 m². En la Figura 49 a) se puede ver que el lote D es mucho más grande que los demás. En la Figura 49 b) se observa que cada lote tiene una distribución de área más proporcionada, manteniendo la división de cuatro lotes y la orientación de los 36 lomillos actuales.

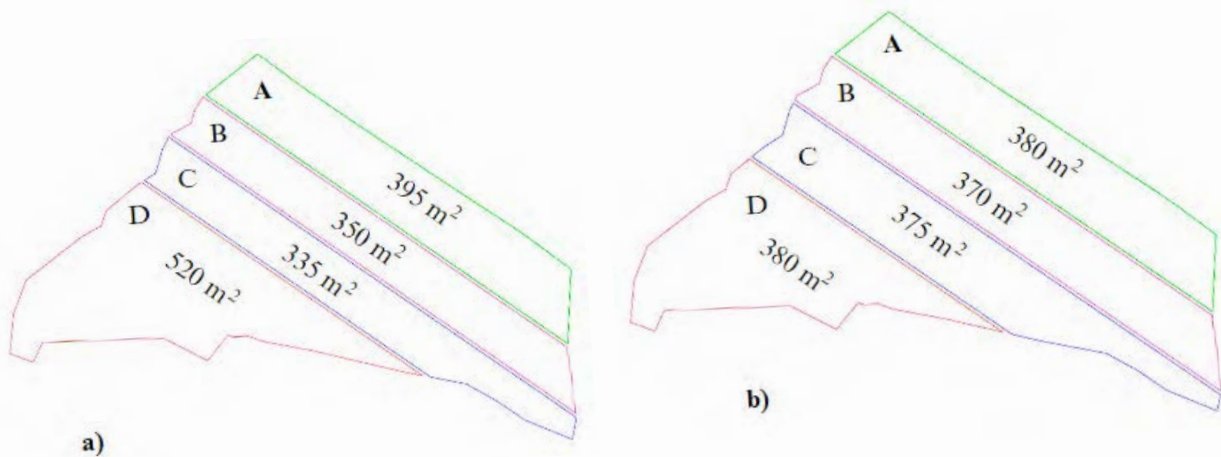


Figura 49. a) Distribución actual de los lotes y b) distribución propuesta

4.3.2.2 Disposición del tubo principal y estandarización de las líneas de goteo

En el ámbito de infraestructura se identificó que el tubo principal se encontraba en la parte inferior de la parcela, donde hay menor elevación. Asimismo, es la zona que presentaba mayor inestabilidad del terreno debido a la pérdida de suelo por deslaves que se mencionó. En una entrevista con Manuel Alfaro, ingeniero agrícola de Netafim, se determinó que lo más conveniente es ubicar el tubo principal en la parte de mayor elevación de la parcela. De esta forma, la distribución del agua en las líneas de goteo estaría a favor de la pendiente. Con este cambio, también se mejoraría la presión de trabajo y la distribución de fertilizantes.

Al analizar la estructura actual de la parcela y su terreno irregular, se recomienda instalar dos tuberías: una en la parte elevada de la parcela y otra en la parte más baja. Esta última presenta menor variación de elevación y es un terreno más plano, como se muestra en la Figura 50. De esta manera, se busca mejorar la distribución del riego en las partes altas, donde se observa una menor uniformidad en su aplicación.

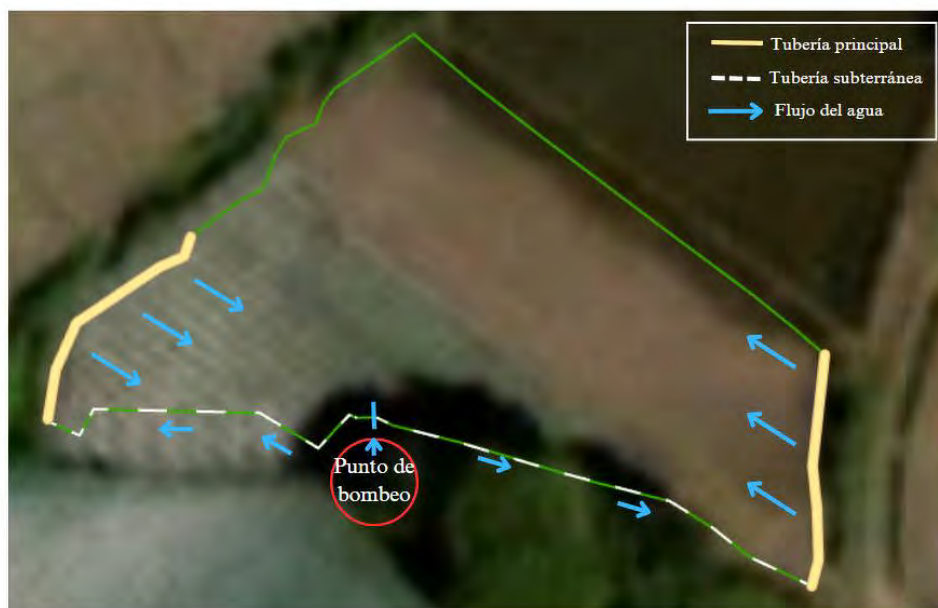


Figura 50. Orientación de la tubería principal propuesta

En la parcela hay dos cintas de goteo diferentes, lo cual se considera ineficiente en un sistema de riego, ya que se busca homogeneizar las aplicaciones. Según la recomendación del Ing. Alfaro, se debe evitar el uso de cintas con caudales tan grandes como la de 1,6 l/h y es necesario sustituir por la de 1 l/h, que actualmente se encuentra en su mayoría en la parcela, con un distanciamiento de 20 cm entre goteros. De esta forma, se facilita el manejo de la cantidad de agua aplicada, lo que evita el exceso de riego y las irregularidades en la uniformidad de aplicación en la parcela.

4.3.3 Equipo de fertirriego

4.3.3.1 Filtros

En la actualidad, el productor implementa el uso de filtros de anillos, los cuales no son recomendables para el riego por goteo. Además, debido al tipo de fuente, que es un reservorio que se llena a partir de una naciente, puede haber muchas partículas orgánicas. Para este caso, se recomienda sustituir el filtro actual por uno de grava. El filtro está indicado para fuentes de aguas superficiales como ríos, arroyos, reservorios y canales, donde filtra partículas orgánicas e inorgánicas como arcillas y limos (Netafim, 2020). Al tomar en cuenta que en la zona el suelo es limo arenoso, el agua usada sin el filtro adecuado puede transportar muchas de estas partículas a los goteros.

El filtro posee un sustrato de sílice. Al entrar el agua, como se ilustra en la Figura 51, pasa a través de la grava por gravedad y las partículas quedan en el sustrato. Al llegar al fondo, el agua sale filtrada lista para utilizarla en el sistema de riego.



Figura 51. Filtro de grava (YAMIT Filtration, 2021)

4.3.3.2 Mezcladores

Uno de los aspectos importantes por considerar para la mejora de la distribución del fertirriego es la mezcla adecuada de los diferentes fertilizantes. Visualmente, como se pudo observar en las figuras 26 y 27, el sistema es muy básico y depende de la mezcla manual del productor. La primera recomendación en este caso es cambiar el punto de succión, ya que este debe ubicarse en la parte más baja del tanque. Lo adecuado es que se sitúe a no menos de 40 cm del fondo y de forma horizontal a un costado del tanque mezclador, como se indica en la Figura 52 para evitar que los sedimentos que quedan en el fondo sean succionados y puedan causar obstrucción de los goteros (Netafim, 2012). Además, es importante incorporar una válvula de purga para la limpieza o descarte de alguna mezcla residual.

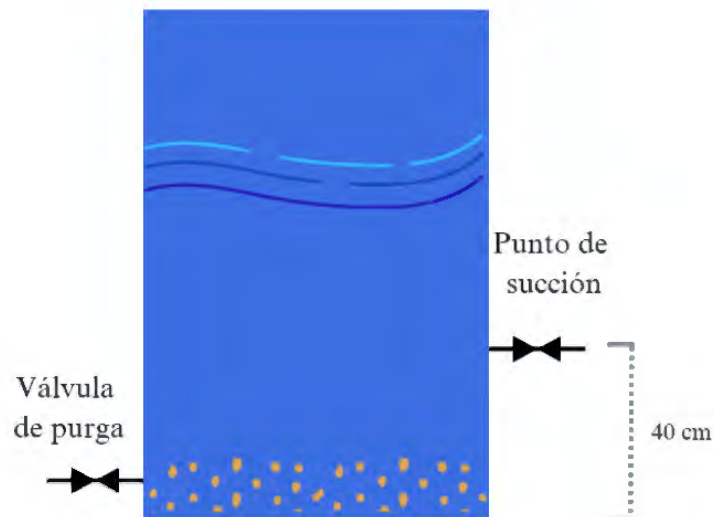


Figura 52. Propuesta del tanque de mezcla

Además, para lograr una mezcla más homogénea, se recomienda mecanizar el proceso mediante un agitador, como se puede ver en la Figura 53, el cual puede colocarse con una estructura de soporte sobre el tanque. Se coloca a un tercio del diámetro del tanque con respecto un lateral del tanque, lo que evita que toque su fondo (Traxco, 2012).

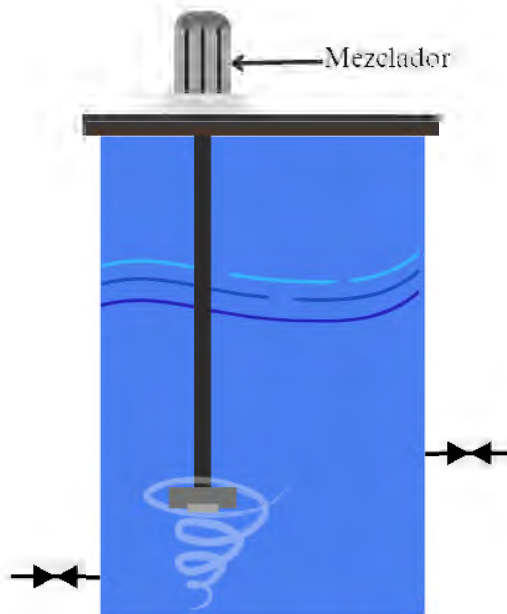


Figura 53. Mezclador recomendado para el sistema de mezcla

4.3.3.3 Inyectores

Para mejorar la inyección del fertilizante se recomienda utilizar un dosificador volumétrico en lugar de hacerlo de forma manual y monitorear con un nivel de manguera. La principal característica de este tipo de dosificadores es que la dosis es proporcional al volumen de agua, sin depender del flujo o diferencias de presión que pueden presentarse con frecuencia (Dosatron, 2009), especialmente en parcelas con características específicas.

Este inyector asegura que la mezcla química permanezca uniforme durante la aplicación de fertilizantes. Como ventaja, posee un motor hidráulico que se activa con el flujo de agua proveniente de la bomba, por lo que no depende de conexiones eléctricas. Además, el dosificador permite varios ajustes de dosis según el tipo de mezcla que se utilice. Como ejemplo, se tienen los inyectores de Dosatron (ver la Figura 54), los cuales poseen estas características beneficiosas.



Figura 54. Dosificador volumétrico Dosatron (Dosatron, 2009)

4.3.4 Implementación de tecnología y sensores

Como parte del control es necesario el monitoreo constante de las condiciones de la parcela y, de ser posible, en tiempo real para que el productor pueda tomar las decisiones necesarias en el momento preciso. En el mercado existe todo tipo de equipos tecnificados y de alta precisión, así como otros de bajo presupuesto con *software* gratuitos, como los usados en este presente estudio.

En la Figura 55 se observa, como resultado del análisis, la existencia de cuatro zonas diferenciadas entre sí al trasponer los mapas de humedad, temperatura y tensión en un día de riego. Esto permite colocar sensores en el centro de cada una de estas áreas, para que el productor pueda homogeneizar los sectores mediante acciones correctivas en cada riego. En cada punto se debe colocar un sensor de humedad, temperatura y tensión, con el fin de monitorear simultáneamente toda la parcela. En un escenario óptimo colocar más sensores en la parcela es ideal, pero teniendo en cuenta la extensión de esta y su tamaño, cuatro puntos bien localizados resultan adecuados.



Figura 55. Mapa de zonas de interés para monitoreo

El objetivo es lograr que cada sensor pueda enviar información. Una de las opciones es la ofrecida por las empresas de riego. Mediante la compra de una licencia, se puede controlar de forma continua los cultivos. Se brinda un tablero con gráficos en tiempo real y mapas

dinámicos, según los sensores seleccionados. Estos tableros pueden ser personalizados para cada productor, por ejemplo, uManage de Netafim (Netafim, 2020).

De igual forma, los *software* de uso libre permiten visualizar datos en tiempo real; entre ellos se encuentran Thinger.io, Arduino Cloud, Adafruit.io y Blink. A diferencia de los ofrecidos por empresas, estos necesitan desarrollarse y codificarse según las necesidades, requiriendo conocimientos básicos de programación como los aplicados en este proyecto, pero enfocados en el envío de información e incluso su almacenamiento en la nube. Cabe destacar que, al ser gratuitos, también tienen limitaciones de almacenamiento.

Dentro de los sensores especializados, se recomienda un sensor de multinivel de humedad y temperatura del suelo. Este sensor puede obtener mediciones a diferentes profundidades, lo que proporciona gran precisión. Mediante un sistema integrado puede enviar los datos a tiempo real a la nube. Por ejemplo, el NetCap de Netafim viene integrado con el sistema NeatBeat, que permite el envío de esta información (ver Figura 56 a). Además, se sugiere implementar tensiómetros para el estudio y brindar información valiosa. Se aconseja colocar uno en cada punto de medición, como se observa en la Figura 56 b. Ambos sensores pueden conectarse a una unidad terminal remota para enviar la información a la unidad de control principal por medio de radiofrecuencia (LoRa).

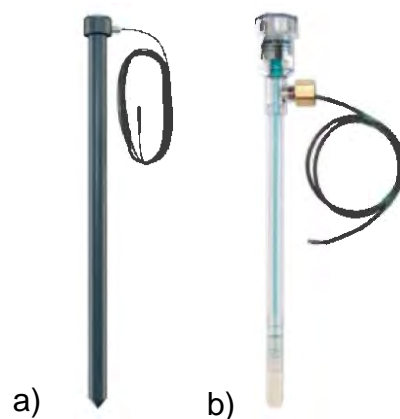


Figura 56. a) NetaCap: sonda de perfil, sensor multinivel de humedad y temperatura y b) Irrometer RSU-V: tensiómetro (Netafim, 2020)

Es importante tomar en cuenta las condiciones meteorológicas para gestionar cualquier actividad en campo. Por lo tanto, se recomienda el uso de una estación que recolecte y almacene datos en la nube, por ejemplo, la estación Davis viene integrada con el sistema NetBeat, como se puede ver en la Figura 58.



Figura 57. Estación meteorológica Davis Vantage PRO2 (Netafim, 2020)

Los sensores Arduino que se utilizan pueden implementarse en sistemas como estos, utilizando microprocesadores que integren LoRa, wifi o Bluetooth y, a la vez, conectarse a plataformas de libre acceso como las mencionadas. El funcionamiento base es el mismo, como se muestra en la Figura 58 donde se busca cumplir el principio de IoT (Internet of the Things), en el cual los dispositivos no solo se conectan a una red para almacenar datos, sino también para tomar decisiones con ellos, buscando la automatización en el futuro.

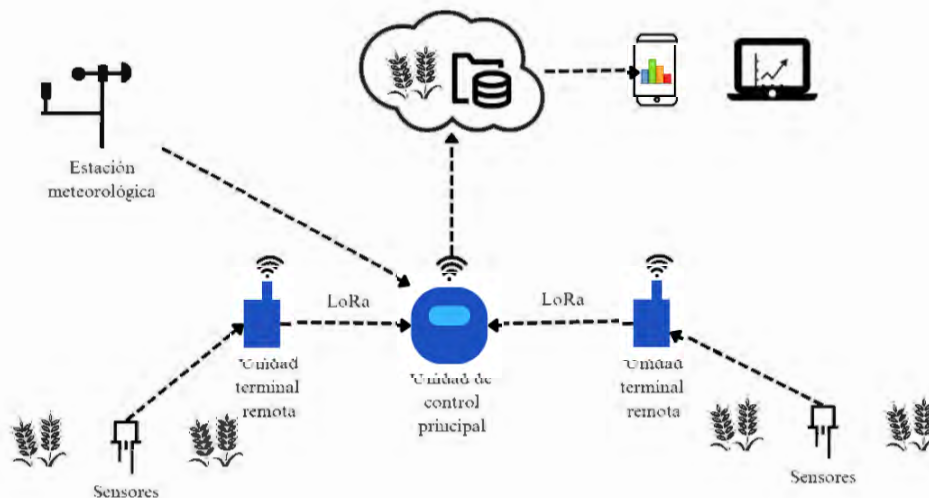


Figura 58. Recomendación de metodología para el uso de sensores en la parcela. Fuente: modificado de Netafim (2020)

En este sistema modelo cada sensor tiene integrado un sistema de conexión a una red, en este caso el recomendado LoRa, lo cual puede ser beneficioso, ya que otros tipos de señales pueden tener dificultades por la ubicación de la parcela. Los sensores de temperatura, humedad y tensión están conectados en cada lugar a una unidad terminal remota que, a la vez, envía la información a la unidad de control principal. Esta unidad se encarga de enviar la información a la nube y a la plataforma destinada para el monitoreo en tiempo real. Además, esta unidad recibe la información de la estación meteorológica.

En el caso de la unidad terminal remota, esta actúa como la antena que envía la información de varios sensores, este es el caso del NetRTU de Netafim. La unidad de control principal, como su nombre indica, se encarga de recibir toda la información y gestionar decisiones con base en parámetros calibrados, ya que cuenta con entradas y salidas digitales y análogas; incluso algunas poseen una pequeña pantalla LCD, por ejemplo, la NetMCU de Netafim (Netafim, 2012) (ver la Figura 59).

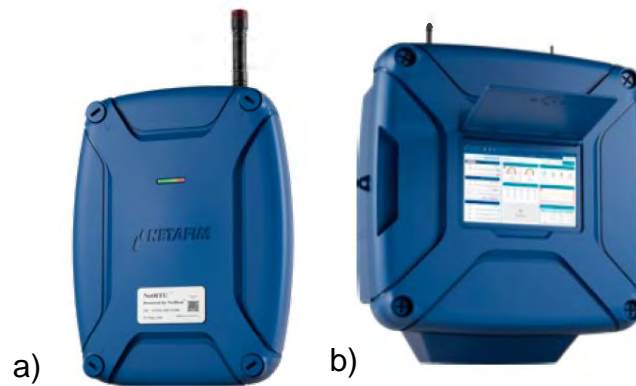


Figura 59. a) NetRTU: unidad terminal remota y b) NetMCU: unidad de control remoto (Netafim, 2020)

Las unidades terminales remotas también permiten conexiones con válvulas solenoides. Mediante una señal enviada desde el centro de control, estas válvulas pueden ser cerradas o abiertas, como se observa en la Figura 60 (Netafim, 2020). Lo recomendable es que cada lote de riego tenga una válvula solenoide. Con esta válvula, se pueden gestionar los tiempos de riego sin necesidad de abrir y cerrar cada válvula de cada cinta de goteo, como el productor actualmente lo realiza.

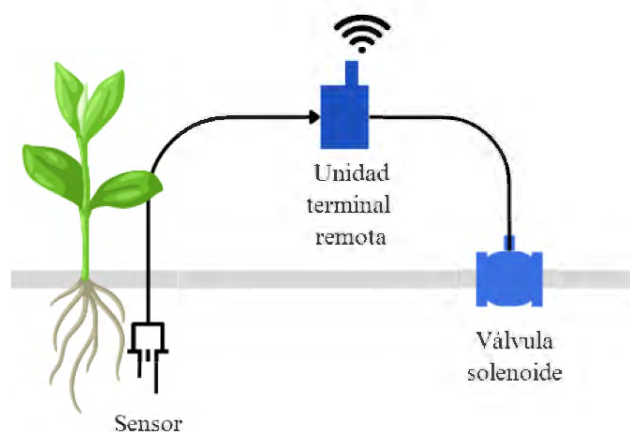


Figura 60. Válvula solenoide conectada con unidad terminal remota. Fuente: modificado de Netafim (2020)

Se recomienda conectar a la unidad de control principal medidores de presión y caudal. En la actualidad, el productor solo cuenta con un manómetro, pero lo ideal es que pueda monitorear de manera precisa la presión y el caudal, además de disponer del almacenamiento de esta información. Con frecuencia, las alteraciones en estos valores se deben a averías en las líneas

de riego, lo cual permite al productor intervenir en estos problemas con mayor antelación y precisión.

Algunos ejemplos de estos equipos son los sensores de caudal, también conocidos como caudalímetros, que existen en gran variedad; uno de ellos es de la marca RainBird. Además, se encuentran los transmisores de presión para riego de Keller, los cuales pueden ser adaptarse en varios idiomas de programación en diferentes *software* (ver la Figura 61) (Keller, 2013; RainBird, 2023).

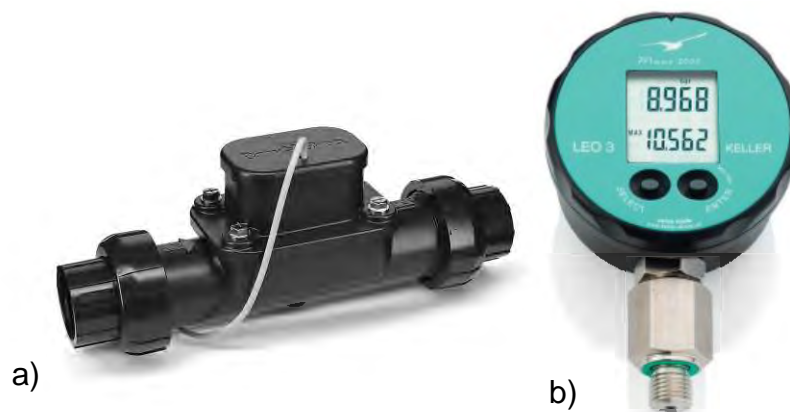


Figura 61. a) Caudalímetro de RainBird (RainBird, 2023) y b) transmisor de presión inteligente de Keller (Keller, 2013)

En el futuro, el propósito es que no solo se reciba y almacene información, sino que desde la unidad de control se puedan gestionar actividades más automatizadas, como el fertirriego, su dosificación, así como el lavado de las líneas por mantenimiento. Al ser una parcela de poco tamaño, muchas de estas actividades funcionan bien de forma manual, pero en miras de un sistema más tecnificado y eficiente, la propuesta brinda el espacio para el desarrollo de todas las ideas que se quieran implementar en el futuro.

Para el caso de estudio, se propone lo ilustrado en la Figura 62. Cada zona de interés localizada tiene los sensores de humedad, temperatura y tensión matricial conectados a la unidad terminal remota, la cual enviará la información de los cuatro sectores a la unidad de control principal. Cada sensor debe enterrarse a 15 cm de profundidad, considerando la profundidad efectiva de las raíces. Finalmente, cuando los datos se suban a la nube y a la aplicación determinada para su uso, permite que, desde distancia, ya sea en una computadora o en campo desde el celular, el productor pueda monitorear el cultivo y tomar decisiones más acertadas en el momento preciso.

Si se utilizan sensores Arduino, se pueden emplear microprocesadores con LoRa y, a la vez, enviar los datos a la nube y a un controlador lógico programable (PLC, siglas en inglés) que puede gestionar decisiones con base en los datos recibidos. El ensamble de sensores demuestra una gran eficiencia para monitorear aspectos como humedad y temperatura. Por ejemplo, en este estudio, el ensamble que se utiliza debe considerar una carcasa de protección que le permita estar en campo durante periodos prolongados. Además, es necesario enterrarlos a una profundidad de 15 cm, como se mencionó.

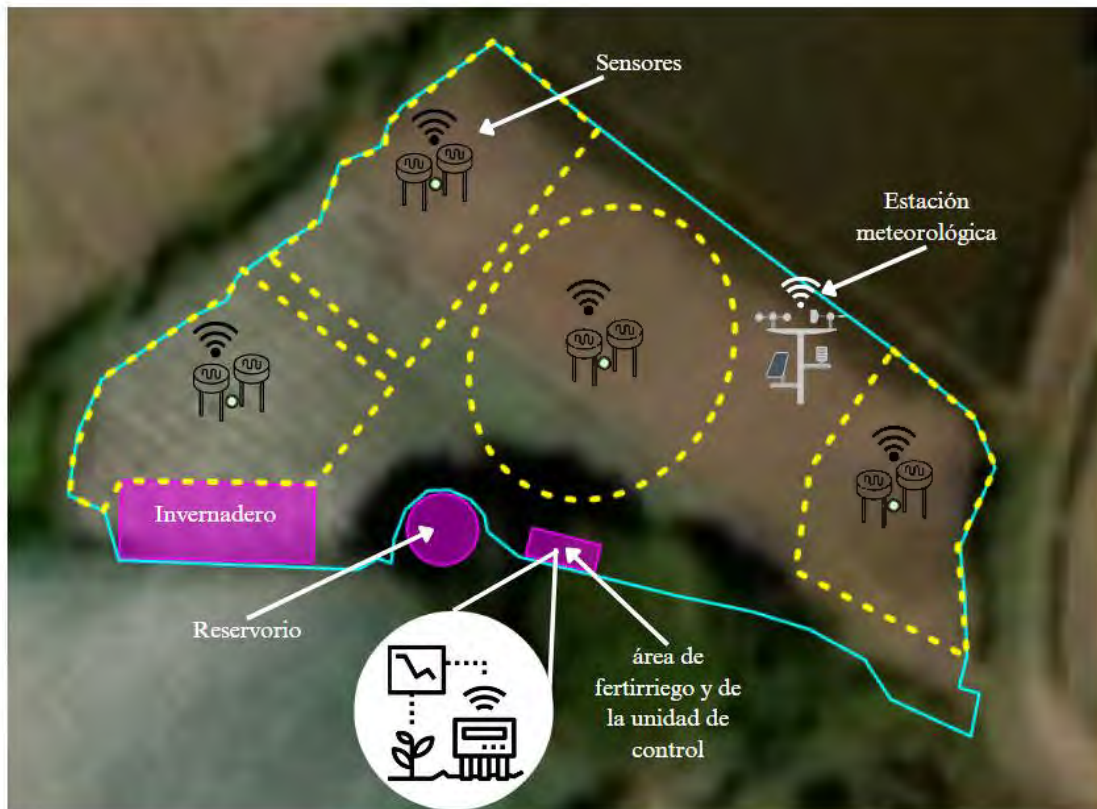


Figura 62. Sistema modelo propuesto para la parcela de estudio

La unidad de control se encuentra en el área de fertirriego, donde se maneja la dosificación, las bombas y la presión de trabajo. Esto transforma esta zona en un pequeño centro de control. Además, se cuenta con la facilidad de estar cerca de la acometida eléctrica, lo cual brinda la energía necesaria a la unidad de control y a los demás equipos que se deseen conectar.

Es importante resaltar que, para la aplicación de sistemas tecnológicos como estos, no basta solo la iniciativa del productor, sino que las instituciones públicas deben acercarse. Estas deben asesorar, capacitar y transferir la información a los productores costarricenses para que puedan adaptarse a nuevas tecnologías que les ayuden a enfrentar los desafíos modernos de la agricultura.

Es importante resaltar que el fin de la propuesta de mejora realizada en este trabajo es brindar una amplia gama de recomendaciones que abarquen todos los aspectos ya discutidos, donde se lograron identificar oportunidades de mejora. Para la aplicación de esta propuesta el productor deberá consultar a los proveedores correspondientes en cuanto a equipos, pero muchas recomendaciones dentro de la propuesta son de implementación propia a criterio del productor, pero muy recomendables para su ejecución directa, como la limpieza de líneas, incorporación de materia orgánica, organización y rotación de los cultivos.

5. CONCLUSIONES

- Se evaluó y analizó un caso de estudio práctico de un sistema de fertirriego mediante la implementación de sensores junto con sistemas de información geográfica, al identificar las oportunidades de mejora y las recomendaciones necesarias para optimizar el sistema de riego.
- Se caracterizó la parcela de estudio y el sistema de fertirriego donde se determinaron factores importantes que interferían en la uniformidad de su aplicación, como la distribución de los lotes de riego, pendiente pronunciada del terreno, el equipo de mezcla e inyección de fertilizante, líneas de goteo con diferentes caudales, obstrucción de goteros y falta de monitoreo de las variables durante el riego.
- Se encontraron diferencias significativas entre los lotes de riego en cuanto al caudal y la conductividad eléctrica, lo que indica que existen sectores en los cuales la cantidad de agua y fertilizante varía considerablemente, estando por debajo o por encima de lo esperado.
- Las variables de humedad y temperatura mostraron diferencias significativas entre los días de aplicación de riego y aquellos en los que no se realizó riego. Lo cual evidencio la importancia del riego en las condiciones del suelo para este caso de estudio. Esto sugiere que el riego ejerce un impacto significativo en las condiciones del suelo y, por consiguiente, en el desarrollo del cultivo.
- Se encontró que hay diferencias significativas entre los puntos medidos a lo largo de la parcela en cuanto a tensión matricial, humedad y temperatura, validando que las condiciones no son homogéneas, lo cual crea las zonas diferenciadas en los mapas.
- Se evidenció, mediante el uso de sensores, pruebas de campo y análisis estadístico, que en las condiciones actuales de la gestión de la parcela existe una aplicación poco uniforme del fertirriego, lo cual hace que las condiciones de humedad, tensión y temperatura no sean homogéneas en toda la parcela de estudio, lo que afecta el desarrollo del cultivo.
- Se propuso la implementación de equipos adecuados para la mejora del sistema de fertirriego, como inyector dosificadores, mezcladores de fertilizantes, filtros, válvulas solenoides, medidores de caudal, manómetros y mejor disposición del equipo actual, en miras de que el mismo sistema pueda optimizarse y adaptarse a futuras necesidades.
- Se determinaron lugares geoespaciales adecuados para la identificación de cuatro zonas de interés para monitorear en la parcela, como resultado de comparar mapas de humedad, temperatura y tensión en un día de aplicación de riego, en las cuales se pueden colocar sensores y así el productor pueda homogeneizar las condiciones de la parcela y hacer acciones correctivas en cada riego.
- Se propuso un modelo de agricultura digital a las condiciones de la parcela estudiada, con sensores, unidades de control remoto, centro de control principal y estación meteorológica con transferencia de datos mediante LoRa, buscando implementar el concepto de IoT para enfrentar los retos diarios en la labor agrícola.

6. RECOMENDACIONES

- Para una segunda etapa de esta práctica dirigida se sugiere obtener mediciones de mejor calidad con los sensores de *software* y *hardware* libre, se recomienda usar los de más alta gama. Lo anterior tiene el fin de tener mejores precisiones en valores y evitar deterioro con el uso. Asimismo, utilizar microprocesadores que permitan la transferencia de datos a la nube.
- Para futuros estudios con el uso de sensores para crear mapas ráster de condiciones de interés se recomienda una instalación de mayor cantidad de sensores en diferentes zonas de la parcela. Lo anterior tiene el fin de analizar mayor cantidad de área y así tener interpolaciones de ráster con más información y menos aproximaciones.
- En cuanto al análisis del suelo, para una segunda etapa es conveniente tomar muestras antes y después del ciclo de cosecha. Lo anterior tiene el fin de tener un panorama más claro de las condiciones del suelo de la parcela finalizada la producción. Además, si se requiere evaluar el estado neto del suelo, se debe obtener una muestra donde haya pasado algunos meses sin implemento de algún agroquímico.
- Implementar herramientas de sistemas de información geográfica de acceso libre que permitan replicar la metodología aplicada en este estudio. Lo anterior tiene el fin de que las licencias no sean un limitante para el uso de estos recursos.
- Para futuros trabajos de graduación se recomienda realizar la toma de datos durante diferentes etapas del cultivo para evaluar las necesidades de este a lo largo de su desarrollo y si estas varían de forma significativa. Lo anterior tiene el fin de adaptar el sistema a cada etapa según la demanda de nutrientes y agua.
- Se debe tomar en cuenta alguna metodología para evaluar el crecimiento del cultivo. Lo anterior tiene el fin de identificar zonas con mayor o menor densidad o producción, para contrastarlo con las zonas de interés que se generan en el estudio y determinar con mayor certeza si existe alguna relación entre sí.
- Para una continuación de este estudio se sugiere evaluar las implicaciones económicas que generarían implementar las recomendaciones propuestas en el balance final de la producción. Además de valorar distintos tipos de financiamiento mediante un análisis de prefactibilidad.

7. REFERENCIAS

- Alam, M. (2021). *Interface Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2 with Arduino*. How to! Electronics. <https://how2electronics.com/interface-capacitive-soil-moisture-sensor-arduino/>
- Bedoya, M.; Yossa, P. y Yossa, L. (2018). *Efectos de la pendiente en el coeficiente de uniformidad en un lateral de riego por goteo*. IV Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2018. <https://www.riego.mx/congresos/comeii2018/assets/ponencias/extenso/18006.pdf>
- Bolaños, A. (1998). *Cultivo de zanahoria*. InfoAgro Costa Rica. <http://www.infoagro.go.cr/Inforegiones/RegionCentralOriental/Documents/Manual%20tecnico%20EL%20CULTIVO%20DE%20ZANAHORIA%20en%20Costa%20Rica.pdf>
- Boyd, C. (2017). *Conductividad eléctrica del agua, parte 1*. Seafood Alliance. <https://n9.cl/4a4lz>
- Caicedo, A. (2017). *Arduino para principiantes*. IT Campus Academy. Editorial CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Calvache, M. (2015). *Fertirriego en Ecuador, presente y futuro*. X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. https://www.researchgate.net/publication/301766196_FERTIRRIEGO_EN_EL_ECUADOR
- Calvo, L. (2005). *Métodos de Riego: Un enfoque práctico para el diseño*. ACCS.
- Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA). (2022). *Dimensiones de cilindros y anillos para muestreo de suelos*. <http://www.cia.ucr.ac.cr/sites/default/files/2022-08/Dimensiones%20de%20anillos%20cilindros%20para%20muestreo%20de%20suelos.pdf>
- Centro Nacional de Tecnología Apropiada (NCAT). (2015). *Hoja de datos: Rotación de Cultivos en Sistemas Agrícolas Orgánicos*. USDA (U.S. Department of Agriculture). <https://n9.cl/fbszl>
- Chacón, V. (2018, 31 de julio). *Esta larga pesadilla de los agroquímicos en Costa Rica*. Semanario Universidad. <https://semanariouniversidad.com/pais/esta-larga-pesadilla-de-los-agroquimicos-en-costarica/>
- Chinchilla Bravo, N. (2018, 27 de julio). *TEC y MAG buscan que agricultores de Cartago utilicen tecnología para aumentar su producción*. <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2018/07/27/tec-mag-buscan-agricultores-cartago-utilicen-tecnologia-aumentar-su-produccion>
- Contreras, J.; López, J.; López, F.; Cánovas, G. y Baeza, R. (2018). *La monitorización de la humedad del suelo como herramienta para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del fertirriego*. Horticultura. <https://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/226402-monitorizacion-humedad-suelo-herramienta-mejorar-eficiencia-sostenibilidad-fertirriego.html>

- Del Valle, L. (2018). *DS18B20 sensor de temperatura con Arduino*. Programar Fácil. <https://programarfácil.com/blog/arduino-blog/ds18b20-sensor-temperatura-arduino/>
- Dosatron. (2009). *How do Dosatron injectors work?* <https://www.dosatron.com/en-us/how-it-works>
- Dumroese, K.; Landis, T. y Wilkinson, K. (2012). *Riego y Fertirriego*. Reforestation, Nurseries & Genetic Resource (RNGR). https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2012_dumroese_k002.pdf
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- FAO. (2011). *Costa Rica: Número uno del mundo en uso de agroquímicos*. <https://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/508248/>
- FAO. (2018). *Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta*. <https://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/1141955/>
- Fernández, J. (2015). *Uso de sensores en agricultura*. Iagua. <https://www.iagua.es/blogs/iriego/uso-sensores-agricultura>
- Gaikwad, S.; Vibhute, A.; Kale, K. y Mehrota, S. (2021). An innovative IoT based system for precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture*(187). doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105626>
- García, G.; García, M. y Ramírez, H. (2015). *Comportamiento de siete cultivares de Allium cepa, L.* ante diferentes niveles de estrés salino. Scielo. <https://n9.cl/102k6>
- García, L. (2017). *Metodologías de campo para determinar profundidad, densidad aparente, materia orgánica, infiltración del agua, textura y pH en el suelo*. Cenida (Centro Nacional de Información y Documentación Agropecuaria). <https://cenida.una.edu.ni/documentos/NP33G216m.pdf>
- Gómez, L. y Jiménez, S. (2019). *Diseño e implementación de un sistema automático de fertirrigación para un cultivo de gulupa*. Universidad de La Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1271&context=ing_automatizacion
- González, P. (2019). *Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27059/1/Consecuencias_ambientales_de_la_aplicacion_de_fertilizantes.pdf
- Guy, B. (2021). *Causas y remedios para el taponamiento de goteros*. Netafim. <https://www.netafim.com.mx/blog/causas-y-remedios-taponamiento-goteros/>
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2012). *Obras de conservación de suelos y agua en laderas*. Repositorio IICA. <http://repiica.iica.int/docs/b3470e/b3470e.pdf>

- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2020). *Boletín Agroclimático: Caña de Azúcar*.
<https://www.imn.ac.cr/documents/10179/473622/BAC+-+CanaAzucar+-+26-10-2020+-+Volumen+2+-+N%C2%BA22>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2020). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2019*.
<https://www.inec.cr/sites/default/files/documetos-biblioteca-virtual/reena-cultivos2019.pdf>
- Keller. (2013). *Intelligent Transmitter with Digital Indication*. <https://download.keller-druck.com/api/download/9JQjd38VoeMK5WVNSowuH8/en/latest.pdf>
- Lin, N.; Wang, X.; Zhang, Y.; Hu, X. y Ruan, J. (2020). Fertirrigation managemente for sustainable presicion agriculture based on Internet of Things. *Journal of Cleaner Production* (277). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124119>
- Liotta, M. (2015). *Riego por goteo*. INTA.
https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_manual_riego_por_goteo.pdf
- Macías, J.; Vargas, A. y Arellano, F. (2018). *Conductividad hidráulica en dos sitios del Valle Central de Costa Rica: análisis comparativo de tres metodologías de ensayo en la zona no saturada*. Scielo.
https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242018000200071#t1
- Martínez, C. (2020). *Cómo interpretar análisis de suelos*. Agro Cultura.
https://www.youtube.com/watch?v=GQFF_oXLHIY
- Martínez, F. (2021). *La importancia de la rotación de cultivos en la calidad del rastrojo*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. <https://idp.cimmyt.org/la-importancia-de-la-rotacion-de-cultivos-en-la-calidad-del-rastrojo/>
- Molina, E. (2011). *Análisis de suelos y su interpretación*. Amino Grow Internacional.
<http://www.infoagro.go.cr/Inforegiones/RegionCentralOriental/Documents/Suelos/SUELOS-AMINOGROWanalisisinterpretacion.pdf>
- Molina, E. (2011). *Análisis de suelos y su interpretación*. InfoAgro Costa Rica.
<https://bit.ly/3cG1Kuf>
- Netafim. (2012). *Guías para el mantenimiento de sistemas de riego*.
- Netafim. (2020a). *NetBeat Digital Farming*.
- Netafim. (2020b). *Sandstorm Double chamber metal media filter*.
- Oliveira, R.; Alves, A.; Zapata, O.; Rodrigues, J. A.; Vinícius, C. y Astoni, D. (2018). *Taponamiento de goteros y del filtro de discos con agua residual sanitaria de una laguna de maduración*. Scielo.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472009000100020
- ONU. (2020a). *Fertilizantes: desafíos y soluciones para proteger nuestro planeta*.
<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/fertilizantes-desafios-y-soluciones-para-protoger-nuestro-planeta>

- ONU. (2020b). *The Sustainable Development Goals Report 2020*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/>
- Pascual España, B. y Pascual Seva, N. (2020). *Riegos de gravedad y a presión*. Universitat Politècnica de València. <https://n9.cl/6dhk8q>
- Pomareda, F. (2022, 30 de marzo). *MAG y agricultores advierten: el país está a las puertas de una caída en la producción de alimentos*. Semanario Universidad. <https://semanariouniversidad.com/pais/mag-y-agricultores-advierten-el-pais-esta-a-las-puertas-de-una-caida-en-la-produccion-de-alimentos/>
- Prakor. (2019). Componentes de un Sistema de Riego Localizado (Parte I). <https://prakor.com/componentes-de-un-sistema-de-riego-localizado/>
- Presidencia de la República de Costa Rica. (2020). Con una inversión de €4.267 millones gobierno impulsa programa de alta tecnología para sector agroproductivo. <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2020/05/con-una-inversion-de-%e2%82%a4-267-millones-gobierno-impulsa-programa-de-alta-tecnologia-para-sector-agroproductivo/>
- Prismab. (2019). *Sensores de suelo para agricultura de precisión*. <https://prismab.com/sensores-de-suelo-para-agricultura-de-precision/>
- Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica (Procomer). (2021). *Aumentan Aplicaciones de IoT en el Sector Agrícola*. <https://bit.ly/3rmuou0>
- Quesada, J. (2017). *Determinación de los Requerimientos de Agua para Diferentes Cultivos de la Zona Norte de Cartago*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9370/determinacion_requerimientos_agua_diferentes_cultivos.pdf?sequence=1&isallowed=y
- Rainbird. (2023). *Sensor de Caudal Fg100*. <https://www.rainbird.com/es/products/fg100>
- Rodríguez, I. (2013). *Reciclado en Suelos de Lodos de Refinería: Nuevas Aproximaciones para la Biodegradación de Hidrocarburos mediante el Manejo de Enmiendas Orgánicas*. Universidad de Murcia. <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/128510/tira.pdf?sequence=1>
- Sánchez, e.; Ruiloba, P.; Morales, L. y Sánchez, e. (2019). Calibración de Sensor de Humedad Aplicado a Sustrato de Fibra de Coco Comercial Comandado por Programación en Arduino. *Revista de Iniciación Científica (RIC)*, 5(Especial I), 92-99. doi:<https://doi.org/10.33412/rev-ric.v5.0.2392>
- Serrano, I. (2007). *Sistematización de la Agrocadena Cebolla*. Ministerio de Producción, Dirección Central Oriental. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/e70-4285.pdf>
- Smith, G. (2020). *¿Qué es un Data Logger y cómo funciona?* Dewesoft. <https://dewesoft.com/es/daq/que-es-un-data-logger#what-is-data-logger>
- Tanji, K. y Kielen, N. (2002). *Agricultural Drainage Water Management In Arid And Semi-Arid Areas*. FAO Irrigation And Drainage Paper 61. <https://www.fao.org/3/y4263e/y4263e00.htm#contents>

- Traxco. (2012). *Agitador para Diluir el Fertilizante a Inyectar*.
<https://www.traxco.es/blog/productos-nuevos/agitador-fertilizantes>
- Vignola, R.; Watler, W.; Vargas, a. y Morales, M. (2017). *Ficha técnica de papa*. MAG.
<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/f01-8214.pdf>
- Villalobos, F. J.; Quemada, M. y Delgado, a. (2016). *Principles Of Agronomy For Sustainable Agriculture*. Springer.
- Villalobos, M. (2001). *Fundamentos de Riego*. Editorial Tecnológica.
- Villavicencio, a. y Villablanca, a. (2010). *Determinación del Coeficiente de Uniformidad de Riego*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile.
https://platina.inia.cl/ururi/informativos/informativo_inia_ururi_17.pdf
- Washington State University. (2023). *Drip Line Rate*. Irrigation In The Pacific Northwest.
<http://irrigation.wsu.edu/content/calculators/drip/drip-line-rate.php>
- Yamit Filtration. (2021). *Manual de Operación, Instalación y Mantenimiento*. F600 Sistemas de Filtración con Gravas. <https://www.yamit-f.com/wp-content/uploads/2021/05/9006206000-f600-yamit-spanish-bermad.pdf>

8. APÉNDICES

Apéndice A. Código usado en ensamble diseñado de sensores Arduino

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <math.h>

#define OLED_RESET 4
Adafruit_SSD1306 display(OLED_RESET);

const int pinDatos = 3;
OneWire oneWireObjeto(pinDatos);
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);

float soilMoistureValue = 0;
float soilmoisturepercent=0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
  display.clearDisplay();

  Serial.begin(9600);
  sensorDS18B20.begin();
}
void loop() {

sensorDS18B20.requestTemperatures();

  Serial.print("Temperatura: ");
  Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(0));
  Serial.println("C");

  display.setCursor(45,0);
  display.setTextSize(1);
  display.setTextColor(WHITE);
  display.println("Temperatura");

  display.setCursor(20,15);
  display.setTextSize(1);
  display.setTextColor(WHITE);
  display.println(sensorDS18B20.getTempCByIndex(0));
  display.setCursor(20,15);
  display.setTextSize(1);
```

```

display.println("    C");
display.display();

delay(250);
display.clearDisplay();

delay(1000);

soilMoistureValue = analogRead(A0);
Serial.println(soilMoistureValue);

soilmoisturepercent= -
0.00002211*pow(soilMoistureValue,3)+0.02202*pow(soilMoistureValue,2)-
7.222*soilMoistureValue+804.1;

if(soilmoisturepercent > 100)
{
    Serial.println("100 %");

    display.setCursor(45,0);
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(WHITE);
    display.println("humedad");
    display.setCursor(20,15);

    display.setCursor(20,15);
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(WHITE);
    display.println("100 %");
    display.display();

    display.setCursor(70,15);
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(WHITE);
    display.println(soilMoistureValue);
    display.display();

    delay(250);
    display.clearDisplay();
}
else if(soilmoisturepercent <0)
{
    Serial.println("0 %");

    display.setCursor(45,0);
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(WHITE);

```

```

display.println("humedad");

display.setCursor(20,15);
display.setTextSize(1);
display.setTextColor(WHITE);
display.println("0 %");
display.display();

display.setCursor(70,15);
display.setTextSize(1);
display.setTextColor(WHITE);
display.println(soilMoistureValue);
display.display();

delay(250);
display.clearDisplay();
}
else if(soilmoisturepercent >0 && soilmoisturepercent < 100)
{
Serial.print(soilmoisturepercent);
Serial.println("%");

display.setCursor(45,0);
display.setTextSize(1);
display.setTextColor(WHITE);
display.println("humedad");

display.setCursor(20,15);
display.setTextSize(1);
display.setTextColor(WHITE);
display.println(soilmoisturepercent);
display.setCursor(20,15);
display.setTextSize(1);
display.println(" %");
display.display();

display.setCursor(70,15);
display.setTextSize(1);
display.setTextColor(WHITE);
display.println(soilMoistureValue);
display.display();
delay(250);
display.clearDisplay();
}
}
}

```

Apéndice B. Datos de calibración de sensores de humedad

Medición	Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Promedio
	% humedad	Analógica	% humedad	Analógica	% humedad	Analógica	
Sensor 1	0 %	458	0 %	445	0.00	457	453.33
	10 %	427	10 %	423	10.00	427	425.67
	20 %	416	20 %	417	20.00	411	414.67
	30 %	348	30 %	233	30.00	381	320.67
	40 %	211	40 %	209	40.00	233	217.67
	50 %	199	50 %	206	50.00	208	204.33
	60 %	192	60 %	189	60.00	205	195.33
	70 %	191	70 %	186	70.00	192	189.67
	80 %	188	80 %	183	80.00	188	186.33
	90 %	183	90 %	182	90.00	185	183.33
	100 %	180	100 %	176	100.00	181	179.00
Sensor 2	0 %	457	0 %	451	0.00	457	455.00
	10 %	420	10 %	447	10.00	416	427.67
	20 %	410	20 %	390	20.00	374	391.33
	30 %	397	30 %	218	30.00	291	302.00
	40 %	220	40 %	214	40.00	287	240.33
	50 %	205	50 %	190	50.00	220	205.00
	60 %	199	60 %	196	60.00	203	199.33

	70 %	194	70 %	192	70.00	198	194.67
	80 %	191	80 %	189	80.00	193	191.00
	90 %	188	90 %	188	90.00	189	188.33
	100 %	182	100 %	183	100.00	182	182.33
Sensor 3	0 %	457	0 %	453	0.00	455	455.00
	10 %	439	10 %	412	10.00	419	423.33
	20 %	419	20 %	385	20.00	398	400.67
	30 %	390	30 %	231	30.00	356	325.67
	40 %	216	40 %	206	40.00	343	255.00
	50 %	197	50 %	190	50.00	204	197.00
	60 %	191	60 %	185	60.00	197	191.00
	70 %	187	70 %	183	70.00	188	186.00
	80 %	186	80 %	182	80.00	187	185.00
	90 %	178	90 %	180	90.00	183	180.33
	100 %	176	100 %	177	100.00	180	177.67

Apéndice C. Datos que se obtienen para evaluar la distribución del fertirriego

Lote	Agua pura		pH 6.6 EC (µS/cm) 469				pH 6.81 EC (µS/cm) 480				pH 6.5 EC (µS/cm) 463			
	Datos		R1				R2				R3			
	Fila	Vaso	Vol (mL)	Q (L/h)	pH	EC (µS/cm)	Vol (mL)	Q (L/h)	pH	EC (µS/cm)	Vol (mL)	Q (L/h)	pH	EC (µS/cm)
A	2	1	51	0.77	6.12	2380	45	0.68	6.06	1647	50	0.75	6.09	1780
	2	2	45	0.68	5.78	2440	55	0.83	6.09	1773	45	0.68	6.14	1710
	2	3	48	0.72	5.73	2095	50	0.75	6.12	1624	54	0.81	6.13	1723
	2	4	55	0.83	5.8	1914	50	0.75	6.15	1584	64	0.96	6.13	1806
	2	5	77	1.16	6.11	703	70	1.05	6.22	1157	78	1.17	6.11	1844
	4	6	54	0.81	5.89	507	52	0.78	6.06	1626	54	0.81	6.15	1768
	4	7	52	0.78	5.92	1999	49	0.74	6.1	1633	48	0.72	6.12	1736
	4	8	47	0.71	5.8	2137	51	0.77	6.08	1651	51	0.77	6.1	1737
	4	9	50	0.75	5.96	2233	57	0.86	6.1	1613	55	0.83	6.07	1804
	4	10	36	0.54	6.33	2470	70	1.05	6.25	1008	64	0.96	6.32	512
B	8	1	50	0.75	6.08	1647	60	0.90	6.17	1206	47	0.71	6.14	1920
	8	2	71	1.07	6.03	1722	61	0.92	6.13	1284	54	0.81	6.16	1747
	8	3	53	0.80	5.98	1720	52	0.78	6.11	1289	48	0.72	6.16	1712
	8	4	36	0.54	6	1480	76	1.14	5.83	1467	76	1.14	6.17	1679
	8	5	-	-	-	-	74	1.11	6.15	1224	61	0.92	6.19	1382
	10	6	48	0.72	6.07	1633	50	0.75	6.03	1086	55	0.83	6.13	1751
	10	7	56	0.84	6.05	1684	50	0.75	6.17	1068	50	0.75	6.16	1765
	10	8	53	0.80	6.01	1733	56	0.84	6.1	1131	54	0.81	6.14	1743
	10	9	74	1.11	5.97	1879	57	0.86	6.08	1364	50	0.75	6.11	1704
	10	10	72	1.08	6.38	472	54	0.81	6.12	1209	76	1.14	6.19	1376
C	13	1	36	0.54	5.98	1471	76	1.14	5.99	1640	70	1.05	6.04	2650
	13	2	47	0.71	5.98	1498	48	0.72	6.04	1610	47	0.71	5.91	2730
	13	3	42	0.63	5.98	1513	50	0.75	6.04	1526	48	0.72	5.89	2830
	13	4	48	0.72	5.99	1492	75	1.13	6.07	1404	72	1.08	5.89	2820
	13	5	78	1.17	5.99	1520	73	1.10	6.09	1261	70	1.05	5.76	2490
	15	6	26	0.39	6.03	1536	53	0.80	5.98	1664	56	0.84	5.93	2640
	15	7	54	0.81	6.04	1554	49	0.74	6.01	1593	50	0.75	5.97	2730
	15	8	48	0.72	6.09	1532	51	0.77	6.03	1507	54	0.81	6.1	1723
	15	9	68	1.02	6.01	1522	74	1.11	6.11	1302	52	0.78	6	2760
	15	10	31	0.47	6.3	577	75	1.13	5.86	1429	41	0.62	6.2	1200
D	20	1	65	0.98	5.76	1804	57	0.86	5.97	1543	49	0.74	6.04	1600
	20	2	39	0.59	5.82	1847	56	0.84	6.15	729	45	0.68	6.12	1937
	20	3	40	0.60	5.91	1402	44	0.66	5.9	2096	50	0.75	6.18	1580
	22	4	59	0.89	5.85	1937	76	1.14	6.1	762	70	1.05	6.34	736
	22	5					62	0.93	6.1	653	75	1.13	6.08	1936
	22	6	73	1.10	5.93	1405	78	1.17	5.91	1769	72	1.08	6.21	1595
	24	7	83	1.25	5.84	1924	70	1.05	6.32	909	60	0.90	6.17	1960
	24	8	75	1.13	5.85	1954	60	0.90	6.24	773	70	1.05	6.05	2200
	24	9	75	1.13	6.18	490	28	0.42	6.24	641	72	1.08	6.15	1375
	30	10	78	1.17	5.9	1992	79	1.19	6.48	678	76	1.14	6.22	1959

Apéndice D

Tabla I. Resultado de los análisis de varianza del caudal, pH y conductividad eléctrica

P-valor	
Valor	Lotes
Caudal	0.0291
PH	0.0688
Conductividad eléctrica	0.0317

Tabla II. Resultado de los análisis de varianza de temperatura, humedad y tensión matricial del suelo (valor del tensiómetro)

P-valor		
Valor	Días con riego y sin riego	Puntos de muestreo
Temperatura	<0.0001	<0.0001
Humedad	<0.0001	0.0449
Tensiómetro	0.0699	<0.0001

Apéndice E

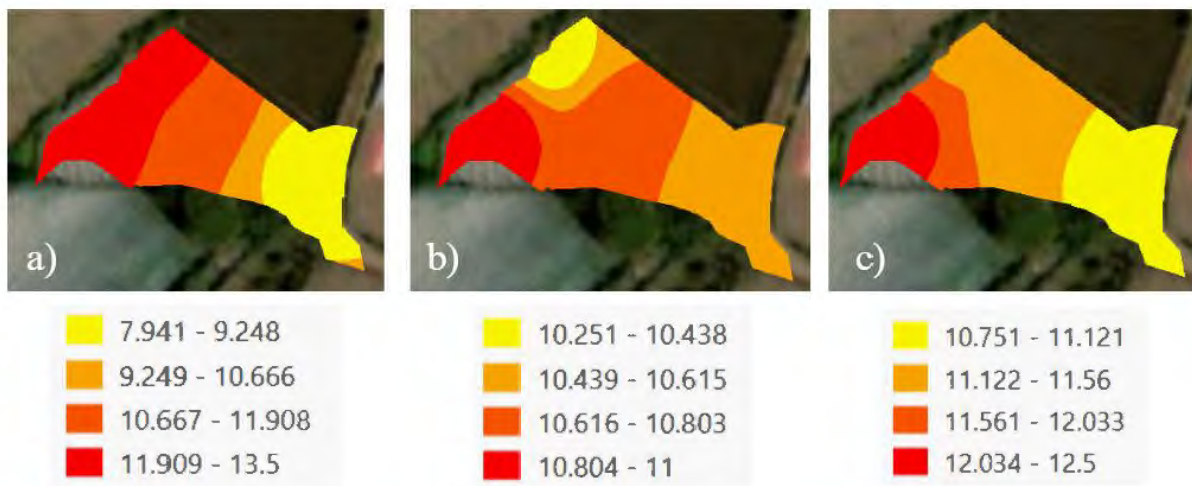


Figura 1. Mapas de tensión sin aplicación de riego a) día 1, b) día 2 y c) día 3

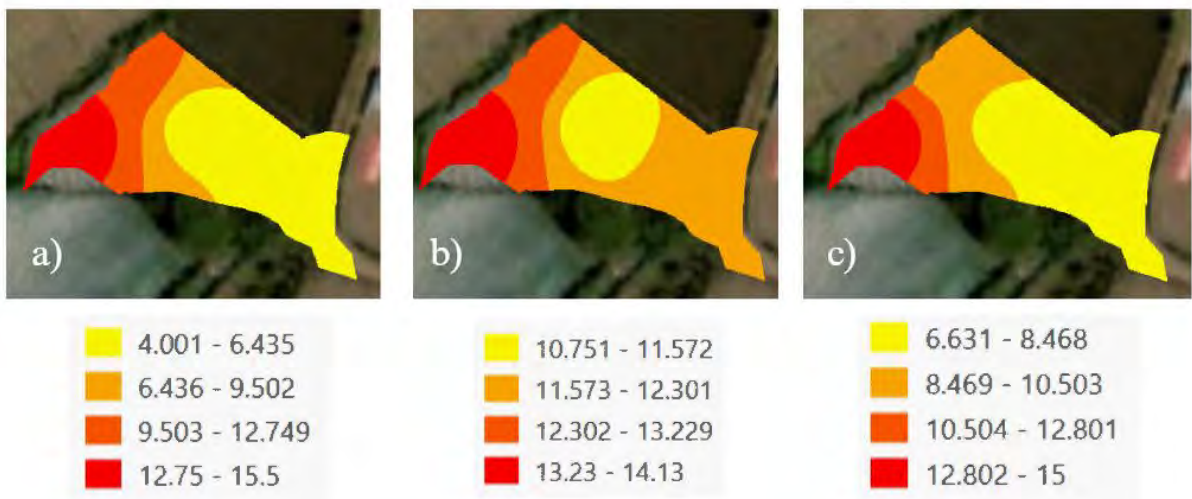


Figura 2. Mapas de tensión con aplicación de riego a) día 1, b) día 2 y c) día 3



Figura 3. Mapas de temperatura sin aplicación de riego a) día 1, b) día 2 y c) día 3



Figura 4. Mapas de temperatura con aplicación de riego a) día 1, b) día 2 y c) día 3.

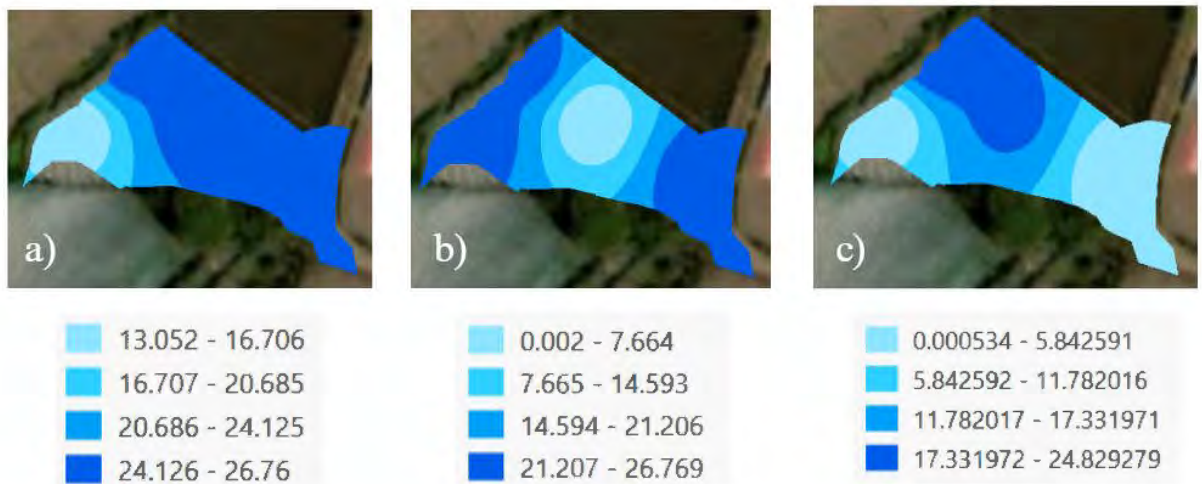


Figura 5. Mapas de humedad sin aplicación de riego a) día 1, b) día 2 y c) día 3



Figura 6. Mapas de humedad con aplicación de riego a) día 1, b) día 2 y c) día 3