

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Biosistemas

**Diseño de un sistema de fertirriego por goteo en un ambiente protegido y
campo abierto de producción de hortalizas ubicado en la Ciudad de los Niños,
Cartago, Costa Rica**

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

Sofía Madrigal Ramírez

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

Junio, 2025

Investigación Dirigida/ Proyecto de Graduación/Práctica Dirigida de Graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Sustentante:

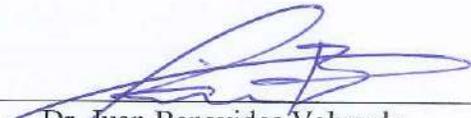


Sofía Madrigal Ramírez

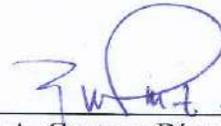
Aprobado por:



Dra. Alejandra Rojas González
Presidente del Tribunal
Escuela de Ingeniería de Biosistemas



Dr. Juan Benavides Valverde
Director (a) del Trabajo Final de Graduación
Escuela de Ingeniería de Biosistemas



M.B.A. Gustavo Díaz Gutiérrez
Asesor (a)
Escuela de Ingeniería de Biosistemas



Lic. Juan Federico Conejo Morales
Asesor (a)



Dr. Pedro Casanova Treto
Invitado (a) Tribunal
Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Dedicatoria

A Dios.

A mi madre, por el cumplimiento de aquella promesa que un día te hice.

Agradecimiento

A mis padres, porque este logro es gracias a ellos.

A mis hermanos, Yislein y Luis Alonso, por ser mi sostén durante toda mi etapa universitaria.

A mis amigos, Kris y Andrés, porque juntos recorrimos este camino, compartiendo desafíos académicos y largas noches de estudio, construyendo una amistad que valoro enormemente.

A mi director, Juan Benavides, por su invaluable guía y constante apoyo académico y profesional a lo largo de este proyecto.

A los miembros de mi comité asesor, Gustavo Díaz y Federico Conejo, por sus valiosas sugerencias, revisiones y retroalimentación constructiva.

A la Ciudad de los Niños, por abrirme sus puertas y darme la confianza de ejecutar este proyecto en sus instalaciones.

Al profesor César y sus estudiantes, por su ayuda valiosa durante la fase de campo, instalación y evaluación del sistema.

A mi esposo, Jorge, por su apoyo y ayuda incondicional, por creer en mí. Su presencia y aliento fueron determinantes para culminar este proyecto.

Resumen

Ante la creciente necesidad de gestionar eficientemente el agua en la agricultura, este estudio abordó el diseño, instalación y evaluación de un sistema de riego por goteo y fertirriego en la Ciudad de los Niños, Cartago (1150 m² distribuidos en áreas de invernadero y campo abierto). La caracterización climática y edáfica del sitio guió el diseño agronómico e hidráulico, determinando láminas brutas requeridas que variaron de 2.83 a 3.89 mm, resultando en tiempos de riego diarios calculados entre 12 y 43 minutos. El sistema fue instalado en cuatro sectores y evaluado mediante indicadores de desempeño hidráulico (coeficientes de uniformidad CU, DU, CU_p) y verificación del fertirriego (conductividad eléctrica CE). Los resultados de uniformidad, que variaron entre 90.3% y 95.1% para los distintos coeficientes, junto con las mediciones de CE que confirmaron la efectiva inyección de nutrientes, validaron el funcionamiento adecuado del sistema instalado. Dada la baja retención de humedad del suelo, se concluye que la aplicación de riego debe ser diaria y fraccionada en pulsos. Asimismo, la limitación del caudal disponible requirió operar el sistema de manera sectorizada. El proyecto establece una infraestructura funcional que sirve como herramienta educativa práctica para la institución y promueve una gestión hídrica sostenible.

Índice

Dedicatoria.....	2
Agradecimiento.....	3
Resumen.....	4
Índice.....	5
Índice de figuras.....	8
Índice de cuadros	10
1. Introducción.....	12
1.1 Justificación e Importancia	12
1.2 Delimitación del problema.....	13
1.3 Objetivos.....	14
2. Marco Teórico	14
2.1 Fundamentos Teóricos	14
2.1.1 Riego por goteo.....	14
2.1.2 Ventajas de riego por goteo	14
2.1.3 Desventajas de riego por goteo.....	15
2.1.4 Tipos de riego por goteo	15
2.1.5 Fertirriego	15
2.1.6 Equipos y accesorios requeridos.....	18
2.1.7 Patrones de cultivo.....	19
2.1.8 Requerimientos hídricos de los cultivos	21
2.1.9 Indicadores de desempeño de un sistema de riego y fertirriego	23
2.2 Ciudad de los Niños.....	24
3. Metodología.....	25
3.1 Descripción general	25
3.2 Sitio de estudio.....	25
3.3 Caracterización del sitio y determinación del requerimiento hídrico del cultivo	26
3.3.1 Evapotranspiración de referencia (ET_0).....	27
3.3.2 Infiltración del suelo	28
3.3.3 Capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP)	29
3.3.4 Densidad aparente.....	30
3.3.5 Coeficiente del cultivo (K_c).....	30

3.3.6	Fuente de agua destinada al riego	30
3.4	Determinación de sistema de riego y su implementación.....	31
3.4.1	Diseño agronómico	31
3.4.2	Diseño hidráulico y planos.....	32
3.4.3	Instalación del sistema de riego por goteo.....	32
3.5	Evaluación del desempeño del sistema de riego diseñado e implementado	33
3.5.1	Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CU) y Coeficiente de Distribución (DU)	33
3.5.2	Coeficiente de uniformidad presiones (CU _p).....	34
3.5.3	Conductividad eléctrica (CE).....	35
4.	Resultados.....	36
4.1	Caracterización del sitio y determinación del requerimiento hídrico del cultivo	36
4.1.1	Evapotranspiración de referencia (ET ₀).....	36
4.1.2	Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)	37
4.1.3	Densidad aparente	37
4.1.4	Infiltración del suelo	38
4.1.5	Coeficiente del cultivo (K _c) y fuente de agua destinada al riego.....	38
4.2	Determinación del sistema de riego y su implementación en campo	39
4.2.1	Diseño agronómico	39
4.2.2	Diseño hidráulico.....	40
4.2.3	Planos de diseño y materiales	40
4.3	Evaluación del desempeño del sistema de riego diseñado e implementado	49
4.3.1	Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CU) y Coeficiente de Distribución (DU)	49
4.3.2	Coeficiente de Uniformidad de Presiones (CU _p).....	49
4.3.3	Conductividad eléctrica (CE).....	50
5.	Discusión	50
5.1	Caracterización del sitio y determinación del requerimiento hídrico de los cultivos... ..	50
5.1.1	Evapotranspiración	50
5.1.2	Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)	52
5.1.3	Densidad aparente (DA)	53
5.1.4	Infiltración del suelo	53
5.1.4	Fuente de agua destinada al riego	54

5.2	Determinación del sistema de riego y su implementación.....	55
5.2.1	Diseño agronómico	55
5.2.2	Diseño hidráulico	56
5.2.3	Planos de diseño.....	59
1.1.1	Coeficiente de Uniformidad de Christensen (CU) y Coeficiente de Distribución (DU)	60
5.3	Evaluación del desempeño del sistema de riego diseñado e implementado	60
5.3.2	Coeficiente de Uniformidad de Presiones (CU_p).....	60
5.3.3	Conductividad eléctrica (CE).....	61
6.	Conclusiones.....	61
7.	Recomendaciones	62
8.	Referencias	64
9.	Anexos	73

Índice de figuras

Figura 1. Ambiente protegido y campo abierto ubicados en la Ciudad de los Niños, Cartago... 26	26
Figura 2. Esquema del desarrollo metodológico para la caracterización del sitio y determinación del requerimiento hídrico del cultivo..... 27	27
Figura 3. Colocación de los anillos para la prueba de infiltración en el suelo en campo abierto de la Ciudad de los Niños..... 29	29
Figura 4. Esquema del desarrollo metodológico para la determinación del sistema de riego y su implementación..... 31	31
Figura 5. Esquema del desarrollo metodológico para la evaluación del desempeño del sistema de riego diseñado e implementado..... 33	33
Figura 6. Recolección de agua de riego emitida por un gotero para la determinación del CU en la Ciudad de la Niños, Cartago..... 34	34
Figura 7. Medición de la presión en un lateral de riego por medio de un manómetro para la determinación del CU_p en la Ciudad de la Niños, Cartago..... 35	35
Figura 8. Valores de densidad aparente determinado mediante el método de los cilindros vs profundidad del suelo en campo abierto y en ambiente protegido..... 38	38
Figura 9. Valores de conductividad hidráulica vs tiempo de infiltración determinado mediante la ecuación de Kostiakov en ambiente protegido y en campo abierto..... 38	38
Figura 10. Distribución general de los lotes de siembra de hortalizas en la Ciudad de los Niños, Cartago, donde se implementó el sistema de riego por goteo diseñado. Elaboración propia (QGIS versión 3.34.11, 2025). 41	41
Figura 11. Plano de distribución de tuberías primarias, secundarias y cintas de goteo en los distintos lotes de siembra para la implementación del riego por goteo en la Ciudad de los Niños, Cartago. Elaboración propia en el programa AutoCAD, versión 2025..... 42	42
Figura 12. Plano de distribución de tuberías primarias, secundarias y cintas de goteo en el ambiente protegido para la implementación del riego por goteo en la Ciudad de los Niños, Cartago. Elaboración propia en el programa AutoCAD, versión 2025..... 43	43
Figura 13. Plano de distribución de tuberías primarias, secundarias y cintas de goteo en campo abierto destinado a la siembra de cebolla para la implementación del riego por goteo en la Ciudad de los Niños, Cartago. Elaboración propia en el programa AutoCAD, versión 2025..... 44	44
Figura 14. Plano de distribución de tuberías primarias, secundarias y cintas de goteo en campo abierto destinado a la siembra de lechuga para la implementación del riego por goteo en la Ciudad de los Niños, Cartago. Elaboración propia en el programa AutoCAD, versión 2025..... 45	45
Figura 15. Esquema del cabezal de riego del sistema de riego por goteo ubicado en la Ciudad de los Niños, Cartago, Costa Rica. Elaboración propia en Inventor..... 46	46
Figura 16. Esquema del sistema para aplicar el fertirriego (Venturi) en los lotes de siembra ubicados en la Ciudad de los Niños, Cartago, Costa Rica. Elaboración propia en Inventor, versión 2025..... 47	47

Figura 17. Curva característica de la bomba hidráulica recomendada Pedrollo modelo 2CP25/14B para un mejor funcionamiento del sistema de riego ubicado en la Ciudad de los Niños, Cartago con un caudal máximo de trabajo de $3 \text{ m}^3/\text{h}$ y una carga dinámica total de 40 m. Tomado de Pedrollo S.p.A. (2020). 80

Figura 18. Curva característica de la bomba hidráulica Pearl JSP 10F16S disponible y utilizada en el sistema de riego ubicado en la Ciudad de los Niños, Cartago. Tomado de Pearl (s.f.). 81

Índice de cuadros

Cuadro 1. Compatibilidad de fertilizantes. Tomado de Taha (2022).	17
Cuadro 2. ET_0 correspondiente al ambiente protegido determinado mediante ET_0 Calculator. .	36
Cuadro 3. ET_0 correspondiente al campo abierto determinado mediante ET_0 Calculator. Se muestran los valores para los meses del año y el comportamiento de los parámetros climáticos que rigen el ET_0	36
Cuadro 4. Coeficiente del cultivo (K_c) para la etapa fenológica media, correspondiente al tomate, cebolla y lechuga. Tomado de Allen et al., (1998).	39
Cuadro 5. Valores calculados de los parámetros utilizados en la programación de riego por goteo, separados por cultivo, en ambiente protegido y campo abierto ubicados en la Ciudad de los Niños.	39
Cuadro 6. Determinación de la potencia requerida para el funcionamiento óptimo del sistema de riego por goteo en la Ciudad de los Niños, Cartago. (Hf: Pérdida de carga por fricción).....	40
Cuadro 7. Lista de materiales empleados para la instalación del sistema de fertirriego en la Ciudad de los Niños, Cartago.	48
Cuadro 8. Valores del CU y DU para la evaluación del sistema de riego por goteo correspondientes a cada lote de siembra en la Ciudad de los Niños, Cartago.	49
Cuadro 9. Valores del CU_p para la evaluación del sistema de riego por goteo correspondientes a cada lote de siembra en la Ciudad de los Niños, Cartago.	49
Cuadro 10. Comparación entre el sistema de riego anterior, el actual y el ideal para la Ciudad de los Niños, Cartago.....	58
Cuadro 11. Caudal disponible para el riego y fertirriego en la Ciudad de los Niños, Cartago ...	73
Cuadro 12. Datos conocidos y utilizados en el diseño del sistema de riego implementado en la Ciudad de los Niños, Cartago.	73
Cuadro 13. Ecuaciones utilizadas para calcular los parámetros de riego de los cultivos de tomate, lechuga hidropónica, lechuga en suelo y cebolla implementados en la Ciudad de los Niños, Cartago. La cita mostrada indica el documento de donde fue extraída la operación para su uso.	74
Cuadro 14. Valores calculados para el riego de los cultivos de tomate, lechuga hidropónica, lechuga en suelo y cebolla implementados en la Ciudad de los Niños, Cartago.	75
Cuadro 15. Pérdidas de carga por fricción en la tubería secundaria del riego por goteo implementado en la Ciudad de los Niños, Cartago, para el cultivo de tomate en ambiente protegido.	75
Cuadro 16. Pérdidas de carga por fricción en la tubería secundaria del riego por goteo implementado en la Ciudad de los Niños, Cartago, para el cultivo de lechuga hidropónica en ambiente protegido.....	76

Cuadro 17. Pérdidas de carga por fricción en la tubería secundaria del riego por goteo implementado en la Ciudad de los Niños, Cartago, para el cultivo de cebolla en campo abierto.	77
Cuadro 18. Pérdidas de carga por fricción en la tubería secundaria del riego por goteo implementado en la Ciudad de los Niños, Cartago, para el cultivo de lechuga en campo abierto.	78
Cuadro 19. Pérdidas de carga por fricción en la tubería principal del riego por goteo implementado en la Ciudad de los Niños, Cartago, para los cultivos estudiados.....	79
Cuadro 20. Valores utilizados para calcular las pérdidas de carga por accesorios (h_m). Los coeficientes de pérdida (K_L) se obtuvieron de (Çengel y Cimbala, 2018)	79
Cuadro 21. Plan de fertilización no proporcional para el cultivo de tomate.	82
Cuadro 22. Continuación plan de fertilización no proporcional para el cultivo de tomate.	83
Cuadro 23. Plan de fertilización no proporcional para el cultivo de cebolla.....	83
Cuadro 24. Plan de fertilización proporcional para el cultivo de lechuga.....	84
Cuadro 25. Plan de fertilización para el cultivo de lechuga hidropónica.	84
Cuadro 26. Solución universal nutritiva de Steiner implementada en el plan de fertilización para la lechuga hidropónica. Tomado de Asao (2012).	85
Cuadro 27. Comparación del estado del sitio de estudio antes de instalar el sistema de riego propuesto y después de su implementación.	86

1. Introducción

1.1 Justificación e Importancia

A nivel mundial, la agricultura se posiciona como el principal consumidor de agua dulce, extrayendo aproximadamente el 70% del suministro anual. Esta estadística, en conjunto con la presión ejercida por los ecosistemas naturales, subraya un problema crucial: el desperdicio alarmante del recurso hídrico en el sector agrícola. Este desafío se agrava aún más debido a la creciente amenaza del cambio climático, que conlleva la posibilidad de un aumento en la intensidad y frecuencia de fenómenos ambientales extremos (Zúñiga y Mendoza, 2021). En este contexto crítico, se hace evidente la necesidad imperante de buscar soluciones sostenibles que aborden la gestión eficiente del agua en la agricultura.

Es en este contexto que se ha promovido la innovación en sistemas de riego más eficientes, entre los que destaca el sistema de riego por goteo. Este método se distingue por su capacidad para lograr un uso más efectivo del agua, con tasas de eficiencia que pueden superar el 90% (Valverde Conejo, 2022). El ahorro significativo de este recurso natural se logra gracias a la aplicación precisa y puntual del agua en el sistema radicular de las plantas, evitando así pérdidas innecesarias (Bansal et al., 2021). Además, este sistema permite la implementación del fertirriego, una estrategia que combina la irrigación y la fertilización, reduciendo la necesidad de mano de obra y acelerando el proceso en comparación con métodos tradicionales (Song et al., 2022).

El aumento del rendimiento de los cultivos es una aspiración común en la agricultura, ya que conlleva un incremento en los ingresos económicos. Para lograr este objetivo, resulta esencial contar con sistemas de riego bien diseñados, especialmente en regiones donde la cantidad de agua proporcionada por las precipitaciones es insuficiente o durante estaciones secas prolongadas, situaciones que son comunes en los cultivos a campo abierto. Por otro lado, incluso en entornos agrícolas protegidos, la implementación de sistemas de riego eficientes sigue siendo fundamental para garantizar la salud y productividad de los cultivos.

Por otra parte, la Ciudad de los Niños es una institución comprometida con el ambiente, en este caso con la protección del recurso hídrico el cual deben distribuir entre diversas actividades agrícolas, no solamente en las áreas de cultivo que se abarcan en el presente trabajo. Por lo que, resalta la importancia de implementar el sistema de riego que les permita el mayor ahorro de agua posible. Se ha evidenciado que este tipo de sistema respecto a otros disminuye significativamente el uso del agua, por ejemplo, para el cultivo de maíz, se disminuye hasta un 40% el consumo de agua respecto al riego por surcos (Wang et al., 2020)

La adopción de un sistema de riego por goteo en los distintos cultivos representa una solución efectiva y sostenible para enfrentar el desafío del uso responsable del agua en la agricultura. Este proyecto contribuirá no solo a la conservación del recurso hídrico, sino también al bienestar de los jóvenes en condiciones de vulnerabilidad a quienes se les brinda cuidado, al mejorar la producción de alimentos y generar ingresos adicionales para la institución. Además, sienta un ejemplo valioso

de prácticas agrícolas sostenibles que pueden ser replicadas en otras comunidades y regiones, impulsando así un impacto positivo a nivel local y más allá.

1.2 Delimitación del problema

La Ciudad de los Niños en Cartago, cuenta con un área destinada para la producción de hortalizas como tomate, cebolla y lechuga. Se compone de un ambiente protegido (480 m²) y un campo abierto contiguo a este, con un área de 682 m² respectivamente, para un total de 1162 m². Sin embargo, este no es el único campo donde se requiere del agua para fines agrícolas, ya que también poseen ganadería lechera, áreas de terreno destinadas al cultivo de pasto para el ganado, entre otras.

Por lo tanto, el uso del agua en cada actividad debe ser racional y eficiente lo que conlleva a que la institución desee implementar un sistema de riego por goteo. De esta forma, lograr disminuir el consumo de agua y al mismo tiempo aprovechar este para proveer los nutrientes al cultivo; es decir, un sistema de fertirriego.

Con base al problema detectado, se planteó el diseño de un sistema de fertirriego que pueda trabajar en ambas zonas de siembra. Para ello, se determinaron los requerimientos hídricos tanto del ambiente protegido como del campo abierto, mediante la toma de muestras de suelo, recolección de datos meteorológicos y uso del software *Et₀ Calculator* para la determinación específica de la evapotranspiración.

Posteriormente, se procedió con el diseño del sistema de riego. Para ello se elaboró una memoria de cálculo donde se estableció la cantidad, la frecuencia y la duración del riego para cada uno de las zonas de cultivo en estudio. Con esta información y otros datos como el área de cultivo, el sistema de siembra y demás, se realizó el plano del sistema de riego correspondiente al ambiente protegido y a campo abierto. A partir del diseño, se definió todo el equipo y materiales necesarios para implementar el riego tales como tuberías, bomba, filtros, mesa de inyección, tanque, accesorios, entre otros.

Por último, se evaluó el desempeño del sistema de riego ya instalado en ambas zonas de cultivo mediante tres indicadores de desempeño: coeficiente de uniformidad de presiones, coeficiente de uniformidad y conductividad eléctrica siendo los dos primeros para evaluar el sistema de riego el tercero para conocer el desempeño del fertirriego. Para ello, se realizarán mediciones una vez el sistema de riego esté instalado en ambos sistemas de siembra.

El alcance del presente trabajo es realizar un diseño de un sistema de goteo con fertirriego, su instalación en las áreas determinadas y la posterior evaluación de este para garantizar un correcto funcionamiento. Posterior a la evaluación del sistema, con base en estos resultados se realizarán recomendaciones en caso de posibles mejoras, así como del manejo de riego según corresponda.

1.3 Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema de riego para un cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) en ambiente protegido, así como para los cultivos de lechuga (*Lactuca sativa*) y cebolla (*Allium cepa*) a campo abierto ubicados en la Ciudad de los Niños, Cartago, Costa Rica para cumplir con los requerimientos hídricos de este mediante la implementación de fertirriego.

Objetivos Específicos

1. Determinar los requerimientos hídricos del cultivo en ambiente protegido y campo abierto para establecer los parámetros críticos del diseño del sistema de riego por medio de la caracterización de los lugares de siembra y el cultivo.
2. Diseñar un sistema de fertirriego para el cultivo en ambiente protegido y campo abierto con el fin de instalarlo en ambos sistemas de siembra mediante el cálculo de los parámetros de riego, el plano de diseño y los materiales e insumos requeridos.
3. Evaluar el sistema de riego por goteo en ambiente protegido y campo abierto para conocer el desempeño de este mediante la aplicación de tres indicadores de desempeño.

2. Marco Teórico

2.1 Fundamentos Teóricos

2.1.1 Riego por goteo

El riego por goteo es uno de los varios métodos de aplicación de agua a cultivos que existen, siendo este uno de los más destacados en cuanto a su alta eficiencia. Este consiste en proporcionar agua presurizada al cultivo con una baja tasa de filtración y alta frecuencia aplicada directamente a la zona radicular de las plantas (Tangwongkit et al., 2014). Se utiliza un sistema de tuberías de pequeños diámetros que son nombrados goteros o emisores los cuales se encargan de brindar cantidades precisas de agua (Bansal et al., 2021).

2.1.2 Ventajas de riego por goteo

Este tipo de riego permite optimizar el uso del agua lo cual es muy ventajoso en zonas donde el acceso al agua sea una limitante. Esto es debido a que no se incurren en los altos desperdicios de un riego por gravedad, por ejemplo, ya que el agua se aplica directamente a un área reducida, la zona radicular de cada una de las plantas. En relación con lo anterior, como el agua es aplicada directamente al suelo, el follaje de las plantas no se ven expuestas a ella, por lo que se reducen las condiciones óptimas para el crecimiento de hongos y bacterias, agentes causales de muchas enfermedades (Gamboa Conejo, 2013).

Asimismo, el porcentaje de evaporación se reduce al evitarse las pérdidas directas por este fenómeno en toda la superficie del suelo donde se cultiva. Por medio de este tipo de riego se logran

niveles de humedad más altos y uniformes localizados en el área donde ocurre la mayor actividad radicular, lo que aporta a la reducción de la evaporación a la vez que aumenta la tasa de transpiración (Zermeño González et al., 2014). Gracias a estos factores se mejora el rendimiento de los cultivos pues estos pueden aprovechar de forma más eficiente el agua y no tienen que incurrir en gastar energía para buscar las moléculas de agua ni sufrir estrés hídrico debido a la alta frecuencia con que este riego es aplicado.

2.1.3 Desventajas de riego por goteo

A pesar de que el riego por goteo brinda una alta eficiencia, se debe tener cuidado al momento de realizar su diseño e instalación, pues se ha encontrado que la productividad del agua se ve afectada por el número de emisores por planta, así como las posiciones de las cintas o mangueras de goteo (Bansal et al., 2021). Por otra parte, al utilizar goteros como emisores, el reducido diámetro de estos hace muy vulnerable este sistema a problemas por obstrucción en las cintas de riego (Gamboa Conejo, 2013).

Esta problemática de la obstrucción hace necesario la colocación de diversos filtros que aseguren que el agua que ingresa a este sistema de riego esté libre de partículas que puedan bloquear el paso del agua a la salida de los goteros (Játiva-Reyes et al., 2019). Por ende, se requiere de una inversión inicial considerable, tomando en cuenta solamente los filtros. Sin embargo, este sistema requiere de otros componentes tales como una bomba, válvulas, tuberías, cintas de goteo, entre otros que suman aún más a dicha inversión inicial.

2.1.4 Tipos de riego por goteo

Se pueden clasificar el riego por goteo según la cinta que se utilice, autocompensantes y no autocompensantes. El primero de ellos permite mantener un mayor control sobre la presión a la que sale el agua en cada uno de los goteros de tal forma que independientemente de la presión que se aplique al sistema, el caudal de salida siempre será el mismo en todos los goteros (Montero Delgado, 2021). Las cintas con goteros autocompensantes están diseñadas con una membrana con propiedades elásticas para brindarle la capacidad de contraerse o dilatarse dependiendo de la presión lo cual le permite mantener un caudal constante en cada uno de los goteros (Carmenates Hernández et al., 2020). El riego por goteo no autocompensante, como su nombre lo indica, no tiene la capacidad de controlar el paso del caudal a la salida, por lo que variaciones en la presión llegan a afectar este caudal.

2.1.5 Fertirriego

Los sistemas de riego por goteo permiten la implementación de prácticas en conjunto, como la aplicación de fertilizantes y productos para prevenir y reducir el impacto de los principales problemas fitosanitarios en campo. Debido a la alta eficiencia que presenta este sistema de riego, permite dar una mayor eficiencia en la utilización del agua y nutrientes, al aportar las cantidades justas en las dosis y momentos donde lo demanda los cultivos (Quesada Solís, 2021). Por ello, al momento de planear el diseño más adecuado, es importante considerar una serie de factores que

aseguren un correcto funcionamiento del mismo, para no recaer en gastos innecesarios o un funcionamiento que comprometa el sistema productivo. El suelo, la evapotranspiración, la demanda de las plantas por etapa fenológica y las condiciones atmosféricas mayormente imperantes en las zonas, delimitan el desempeño mínimo del sistema (Quesada Solís, 2021).

2.1.5.1 Calidad del agua para fertirriego

Para una adecuada aplicación de fertirriego en el cultivo, se debe considerar, entre otros factores, algunas propiedades del agua a utilizar. Una de las principales es la alcalinidad del agua, la cual es la capacidad del agua para neutralizar ácidos. Un alto valor alcalino puede ocasionar obstrucciones en los goteros debido a que los bicarbonatos y carbonatos se mezclan con los cationes o la solución nutritiva provocando precipitados (Rodríguez García y Vega Triana, 2022).

Aunado a lo anterior, es importante considerar que el pH del agua es un indicador de la alcalinidad pues existe una relación entre ellos. Se estima que un valor mayor a 7 de pH denota agua alcalina, sin embargo, una alta alcalinidad se alcanza cuando la concentración de bases es elevada (Rodríguez García y Vega Triana, 2022).

Asimismo, altos niveles de algunos elementos químicos como el hierro (Fe) y manganeso (Mn) en el agua pueden afectar de forma negativa un sistema de fertirriego. Utilizar agua con presencia de Fe y Mn para aplicar fertirriego puede ocasionar que, con el tiempo, en las tuberías, cintas de goteo y demás implementos que conforman el sistema de riego se adhieran óxidos insolubles. Por lo tanto, se dificulta el paso del agua e incluso puede llegar a bloquear los goteros por completo (Rodríguez García y Vega Triana, 2022).

2.1.5.2 Solución fertilizante

La deficiencia de nutrientes en los cultivos afecta directamente el crecimiento de estos y por ende el rendimiento. Por ello, en la agricultura se utilizan fertilizantes que aportan los nutrientes requeridos. En el caso del fertirriego, se utilizan soluciones fertilizantes, es decir, los nutrientes se diluyen en agua formando así la solución. A modo general, existen tres principales macronutrientes que las plantas deben tener a disposición los cuales son nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). El N es necesario para el crecimiento del follaje, el P ayuda a un adecuado desarrollo de raíces, flores, semillas y frutas mientras que el K aporta en el crecimiento del tallo, favorece tanto el transporte del agua en la planta como la fructificación (Shahena et al., 2021).

El calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) también son macronutrientes, pero se consideran secundarios. Además de los macronutrientes, también son importantes para el desarrollo de la planta los micronutrientes que, a diferencia de los anteriores, se requiere de una cantidad menor. Algunos de estos son el cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), boro (B) y zinc (Zn) (Shahena et al., 2021).

En fertirriego se deben utilizar fertilizantes adecuados cuya principal característica es que deben ser altamente solubles en agua, los cuales pueden ser líquidos o sólidos. Según el elemento que se necesite aplicar así será la selección del fertilizante. Por ejemplo, fuentes de N se encuentran en el

nitrate de amonio (NH_4NO_3), nitrate de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), tiosulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$) mientras que el K puede ser aportado por el cloruro de potasio (KCl), sulfato de potasio (K_2SO_4), nitrate de potasio (KNO_3). Asimismo, el P se encuentra en el fosfato de urea ($(\text{NH}_2)_2\text{COH}_3\text{PO}_4$), fosfato de amonio ($(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$), fosfato monoamónico ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) (Taha, 2022).

Cada fertilizante posee propiedades físicas y químicas distintas, lo que provoca que la mezcla entre algunos de ellos en ocasiones no sea compatible. Cuando se aplican dos o más fertilizantes incompatibles al mismo tiempo es posible que se formen precipitados que van a bloquear elementos del sistema de riego como los filtros o los goteros. Al momento de realizar los planes de fertirriego se debe considerar que los fertilizantes con fosfatos y sulfatos no deben ser mezclados con los que contienen calcio, debido a que estos son incompatibles en altas concentraciones (Taha, 2022). Se muestran algunos ejemplos de fertilizantes y su compatibilidad en el cuadro 1.

Cuadro 1. Compatibilidad de fertilizantes. Tomado de Taha (2022).

Fertilizante	Compatible con
Urea (U)	NA – SA – MAP – MKP - KNO_3 - K_2SO_4 – KCl - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ - MnSO_4 - B
Nitrato de amonio (NA)	U – SA- MAP- MKP- KNO_3 - K_2SO_4 – KCl – $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ - MnSO_4 - B
Sulfato de amonio (SA)	U – NA – MAP – MKP - KNO_3 - K_2SO_4 – KCl - MnSO_4 - B
Fosfato monoamónico (MAP)	U – NA – SA – MKP – KNO_3 – K_2SO_4 – KCl – B
Fosfato monopotásico (MKP)	U – NA – SA – MAP – KNO_3 – K_2SO_4 – KCl – B
Nitrato de potasio (KNO_3)	U – NA – SA – MAP – K_2SO_4 – KCl – $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – MnSO_4 – B
Sulfato de potasio (K_2SO_4)	NA – SA – MAP – MKP – KNO_3 – KCl - MnSO_4 – B
Cloruro de potasio (KCl)	U – NA – SA – MAP – MKP – KNO_3 – K_2SO_4 – $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – MnSO_4 – B
Nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$)	U – NA – KNO_3 – KCl
Sulfato de magnesio (MnSO_4)	U – NA – SA – KNO_3 – K_2SO_4 – KCl
Boro (B)	U – NA – SA – MAP – MKP – KNO_3 – K_2SO_4 – KCl

2.1.5.3 Métodos para suministrar la solución fertilizante

Existen principalmente dos métodos para aplicar la solución fertilizante a un sistema de fertirriego, siendo el primero por medio de un tanque de dilución en el cual se incorpora el agua junto a los fertilizantes solubles en unidades de partes por millón (ppm) a la cual se le conoce como solución nutritiva. Este se conecta a la cabecera de riego y su contenido se dirige hacia las líneas de riego de manera constante a medida que se activa el riego, de tal forma que es posible controlar la cantidad de fertilizante que se añade. Sin embargo, la concentración de los elementos nutritivos presentes en el agua durante el riego depende del tiempo (Kafkafi y Kant, 2005). El segundo método, utiliza una bomba externa que le suministra los fertilizantes diluidos al sistema de riego, por medio de un diferencial de presión de forma directa a las líneas de riego. Se pueden conseguir diversos tipos de bombas como las que aprovechan el caudal de agua para succionar los fertilizantes y conducirlos hacia las líneas de goteo, llamadas Venturi. Asimismo, existen bombas que mediante la presión y el flujo de la tubería principal accionan un pistón para introducir al sistema la solución fertilizante (Kafkafi y Kant, 2005).

A diferencia del tanque de dilución, con la bomba externa es posible controlar la concentración de fertilizante que se aplican al cultivo durante el riego, así como, emplear mayores dosis con el fin de distanciar las aplicaciones en el tiempo según la etapa fenológica del cultivo. Además, se utiliza una mayor concentración de fertilizantes, cuya estimación se realiza en dosis por hectárea (dosis/ha) debido a que este no es aplicado siempre que se riego el cultivo (Kafkafi y Kant, 2005).

2.1.6 Equipos y accesorios requeridos

Para implementar un sistema de riego por goteo es necesario una serie de equipos, accesorios y demás materiales para el correcto funcionamiento del sistema. Se reconocen tres principales componentes en este tipo de riego los cuales corresponden al cabezal de riego y filtros, la red de conducción y distribución y los emisores de riego (Játiva-Reyes et al., 2019).

2.1.6.1 Cabezal de riego y filtros

Un cabezal de riego se conoce como aquel sistema que permite la filtración, medición, tratamiento y fundamentalmente proporcionar el caudal de agua requerido. Consta de tres sistemas comúnmente: impulsión, fertirrigación y filtrador (Carpio Carpio, 2017). Por ende, dentro de los equipos requeridos para el cabezal están la bomba cuya selección depende directamente de la carga dinámica total, así como de la presión a la que se requiere operar (Carpio Carpio, 2017), válvulas para controlar variables tales como la presión y el caudal y manómetros para medir presión. Como tercer equipo están los filtros cuya principal función es evitar el problema de obstrucción en los goteros (Játiva-Reyes et al., 2019).

Para el apartado de fertirriego, existen tres grandes equipos que se encargan de la inyección de los fertilizantes a toda la red de distribución los cuales son los tanques de fertilización, inyectores Venturi y los dosificadores que pueden ser eléctricos o hidráulicos (Rodríguez Villegas, 2022). Se debe considerar que una inadecuada dosis de los fertilizantes puede provocar precipitados lo que

dificulta el paso del agua al obstruirse los emisores, aunque también este problema puede deberse a la presencia de partículas minerales tales como arenas, limos o arcillas, así como por partículas orgánicas (Carpio Carpio, 2017). Los sistemas de filtrado buscan restringir el paso de todas dichas partículas y así logran un flujo continuo de riego. Algunos de los más utilizados son los decantadores, el hidrociclón, filtros de arena, anillos y de malla (Rodríguez Villegas, 2022).

2.1.6.2 Red de conducción y distribución

Este sistema cuenta con una red de tuberías primarias, secundarias y en algunos casos terciarias y cuaternarias las cuales, en la mayoría de los casos suelen ser de PVC (policloruro de vinilo) (Játiva-Reyes et al., 2019). Aunque el PVC es el material más utilizado, también existen otros que dependiendo del caso son necesarios adquirir tales como el polietileno, fibrocemento, hormigón, fundición y acero siendo los dos primeros los segundos más utilizados para los sistemas de riego (Montero Delgado, 2021).

Esta red debe ser debidamente protegida y adecuada para mantener un control y regulación respecto al caudal y presión en todo el sistema, por lo que, se utilizan distintos tipos de válvulas para lograr este cometido. Dentro de las más utilizadas están las válvulas reguladoras de presión, de alivio, válvulas de compuerta, válvulas de bola, de retención y válvulas para evacuar el aire (Rodríguez Villegas, 2022). Cada una de ellas cumple distintas funciones y pueden ser accionadas de forma manual o remota por medio de uso de cables eléctricos, de forma neumática, hidráulica o mediante telemetría infrarroja (Montero Delgado, 2021).

2.1.6.3 Emisores de riego

Cada una de las plantas reciben el agua y sus respectivos fertilizantes por medio de emisores open ground crops que en el caso de riego por goteo se utilizan los goteros. Estos usualmente se encuentran sobre unas líneas de polietileno distanciados entre ellos de 20 cm a 50 cm, lo cual a su vez depende principalmente de las condiciones requeridas por el cultivo e incluso del suelo. El agua sale de los goteros de gota en gota lo que permite que se distribuyan en la zona radicular hasta forma el bulbo húmedo (Játiva-Reyes et al., 2019).

2.1.7 Patrones de cultivo

En la agricultura, se han desarrollado a lo largo del tiempo diversos métodos para cultivar los cuales han surgido debido a las necesidades y limitaciones a las que se enfrentan los productores. El cambio climático, problemas en el suelo como erosión, contaminación, compactación, acidificación, falta de espacio por competencia de uso de terrenos son algunos de los factores que han impulsado incursionar en otras técnicas para poder cultivar (Sarandón, 2020). Se mencionan a continuación algunas de las principales:

2.1.7.1 Campo abierto

Como su nombre lo indica, este es el método tradicional de producción agrícola implica cultivar en suelo al aire libre, sin ningún tipo de protección a nivel estructural. Debido a que el cultivo está

expuesto a las condiciones climáticas del lugar, insectos, aves y demás animales que puedan convertirse en una plaga los productores deben tomar mayores precauciones para lograr un alto rendimiento. Una buena práctica es una correcta selección del cultivo a sembrar basada en las características climáticas del sitio y la época del año. Asimismo, es importante realizar una selección de cultivo que se adapte a los recursos disponibles, tales como mano de obra, agua para riego, tipo de suelo y sus propiedades fisicoquímicas (Ganpat y Isaac, 2012).

2.1.7.2 Ambiente protegido

Este método para cultivar se basa en satisfacer parcial o totalmente los requerimientos del cultivo por medio de una estructura con una cubierta normalmente de plástico transparente que protege a las plantas de variables climáticas tales como el viento, precipitaciones, temperaturas extremas, radiación solar abundante, entre otras. Además, un ambiente protegido, permite controlar la propagación de enfermedades causadas por insectos al limitar el ingreso de estos gracias a su cubierta. Es decir, brinda condiciones ambientales óptimas para el crecimiento adecuado del cultivo mejorando notoriamente el rendimiento del mismo (Mehta y Savita, 2023).

Existe una gran variedad de tipos de ambientes protegidos que se diseñan según las condiciones del lugar, cultivo, nivel de tecnificación y automatización e incluso aspectos económicos. Estos se pueden clasificar según su forma (tipo Lean, envergadura uniforme, envergadura desigual, tipo cresta), su material de construcción y cobertura (estructura construida de madera, tubos, material de cubierta de vidrio, plástico o paneles rígidos) diseño y ventilación (con ventilación natural, casa Net, casa malla de sombra, túnel de paso) (Mehta y Savita, 2023).

2.1.7.3 Hidroponía

La hidroponía consiste en cultivar en una solución nutritiva ya sean con o sin sustrato y no requiere de suelo. Se han desarrollado diversos tipos de hidroponía, que en grandes rasgos se pueden dividir en dos principales clases siendo la primera el cultivo en solución y la segunda, en medio sin suelo. Dentro de los cultivos en solución se pueden mencionar los sistemas que utilizan la técnica de película nutritiva (NFT), la aeroponía, cultivo en balsas flotantes, entre otros, mientras que el cultivo en medio sin suelo se caracteriza por utilizar sustrato que funciona como soporte de las raíces y los nutrientes se aportan obligatoriamente desde el riego directamente en las raíces (Niu y Masabni, 2022).

En el caso del cultivo en sustrato, se suelen utilizar como sustrato fibra de coco, cáscaras de arroz, turba, lana de roca entre algunos otros. Para la selección de este se deben considerar sus propiedades fisicoquímicas, el costo y la disponibilidad. En cuanto a la solución nutritiva, este se considera el punto clave en la hidroponía debido a que se debe brindar a las plantas una proporción adecuada y constante de nutrientes, agua y oxígeno durante todo el ciclo del cultivo (Niu y Masabni, 2022).

2.1.8 Requerimientos hídricos de los cultivos

El requerimiento hídrico de los cultivos responde a un proceso de formación de células nuevas, sostén de la estructura y termorregulación que comprende el mayor porcentaje de dicho requerimiento hídrico. El proceso de termorregulación permite liberar calor mediante la vaporización del agua presente en los estomas de la planta (transpiración) y la evaporación del agua en el suelo sustrato que se encuentra a nivel del sistema radicular, formando, ambos procesos, la Evapotranspiración del cultivo (ET_c) (Sabzevari y Eslamian, 2023).

Para calcular la ET_c se debe realizar de forma indirecta, considerando las variables atmosféricas (temperaturas, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar e insolación) que forma la Evapotranspiración de referencia (ET_0) calculada con la ecuación FAO- Penman Monteith. La ET_0 se explica como la capacidad que tiene la atmosfera de absorber agua del ambiente; y considerando la resistencia a la pérdida de agua que presentan todos los cultivos según su especie y su estadio, conocido este como coeficiente de cultivo (K_c). La multiplicación de la ET_0 por la K_c forma, según la ET_c (Sabzevari y Eslamian, 2023).

2.1.8.1 Requerimientos hídricos del Tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum*) pertenece al grupo de cultivos que son producidos mayormente en ambientes protegidos, tanto a nivel nacional como internacional (Quesada-Roldám y Bertsch-Hernández, 2012). En Costa Rica, el uso de híbridos ha tomado mucha fuerza debido a su excelente valor comercial y el rendimiento que alcanzan. No obstante, la demanda de nutrientes y agua es elevada en este tipo de cultivo, por lo que es fundamental establecer diseños, como el fertirriego, que permitan dar el mayor uso eficiente de recursos y obtener parámetros de primera calidad (Quesada-Roldám y Bertsch-Hernández, 2012). A través de este sistema, se garantiza un suministro adecuado directamente al bulbo húmedo en el suelo (rizosfera), zona donde se concentra la mayor actividad de absorción por parte de las raíces de absorción.

La biomasa de los tejidos de las plantas de tomate y en general, están constituidas por un 80% a 90% de agua. El déficit hídrico durante el ciclo de vida de la planta puede comprometer funciones fisiológicas vitales para el correcto desarrollo de la misma, entre ellas el transporte de nutrientes y crecimiento o reparación de tejidos (Pacheco Zamora, 2018). Por lo tanto, en el diseño de un sistema de riego es indispensable calcular el coeficiente del cultivo más apropiado según las condiciones del lugar donde se va a desarrollar.

Aunque se debe considerar la variedad, la densidad de siembra y las condiciones climáticas del lugar, la FAO reporta un promedio de kc para el cultivo de tomate siendo 0,7 para la etapa inicial, 1,15 para la etapa media y 0,90 para la última etapa del cultivo (Allen et al., 1998).

Además de las plantas, es importante que la aplicación de fertirriego asegure condiciones óptimas para el desarrollo de la actividad microbiana. Existen indicadores como el pH del agua y la conductividad eléctrica que han sido ampliamente estudiados para asegurar los rangos óptimos en los cultivos. El reciente estudio de Maltas et al (2022), en el caso del tomate, menciona que los parámetros más adecuados para la salud de la rizosfera oscilan entre 6.5 y 7.2 de pH y conductividades cercanas a los 2.0 dS m⁻¹.

2.1.8.2 Requerimientos hídricos de la cebolla

La cebolla (*Allium cepa* L.) es un cultivo perenne y existen diversas variedades por lo que se pueden encontrar cebollas esféricas, planas, cónicas, entre otras. Asimismo, el color puede ser blanco, amarillo o rojo. Esta hortaliza se puede cultivar mediante siembra directa o trasplante, en cuyo caso las plántulas se trasplantan cuando poseen de tres a cuatro hojas centibares (El Mashad et al., 2019). Requiere idealmente de suelos de textura franco y con porcentajes de materia orgánica mayores al 3%. En cuanto a pH del suelo, debe ser cercano 6.0-7.0 y no deben ser salinos (<1.2 mmhos/cm) (Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), 2019).

Los requerimientos hídricos de un cultivo de cebolla varían de acuerdo con el clima, propiedades del suelo y el sistema de riego. Se estima que la tensión hídrica ideal para el cultivo de cebolla, la cual es una propiedad del suelo de retener agua, debe estar en un rango de 10 a 35 centibares (El Mashad et al., 2019). Aplicar un riego deficiente puede repercutir en un mal crecimiento de las cebollas mientras que un exceso de agua durante la madurez de este cultivo podría afectar en que los bulbos sean acuosos y por ende baja su calidad en poscosecha (Nair, 2021).

En cuanto a la aplicación de riego para la cebolla, esta debe ser frecuente. Se recomienda emplear un sistema de riego por goteo ya que, en comparación a los aspersores, se evitan problemas de remoción de insumos foliares agrícolas reduciendo de esta forma el riesgo de enfermedades foliares. Es importante recalcar que no es posible establecer un parámetro fijo de riego para la cebolla pues este depende de factores como la ET₀ de cada sitio, la capacidad del suelo para retener agua, estado vegetativo y variedad de las plantas, entre otros. Sin embargo, aunque la cebolla es capaz de soportar una sequía, se requiere como mínimo una cantidad de agua entre 4500-5000 m³/ha para un sistema de riego por goteo (MINAGRI, 2019).

2.1.8.3 Requerimientos hídricos de la lechuga

La lechuga (*Lactuca sativa* L) es una de las hortalizas de mayor consumo en el mundo. Es un cultivo anual y requiere preferiblemente ser cultivada en suelos de textura franco o franco-arenoso. El pH del suelo ideal debe estar entre 6 y 6.8 y sus niveles de salinidad deben ser moderados (Medina Jiménez, 2015).

Respecto al riego, debe ser el adecuado si se desea alcanzar el máximo rendimiento de lechuga debido a que este afecta directamente en el crecimiento de esta hortaliza. Ambos extremos en la aplicación de agua al cultivo afectan, un exceso provoca una rápida propagación de enfermedades mientras que un déficit desencadena estrés y disminución de la calidad comercial. Asimismo, se requiere que el agua utilizada para riego mantenga un contenido de salinidad entre 0.45 y 2.0 g/L y una conductividad eléctrica entre 0.7 y 3.0 dS/m (Blanco Moreno, 2019).

Este cultivo es altamente sensible a estrés hídrico, el cual se ve reflejado en la reducción del tamaño y mayor grosor de las hojas (Blanco Moreno, 2019). Se ha estimado que el requerimiento hídrico de la lechuga ronda los 3000-3500 m³/ha en un riego por goteo (Medina Jiménez, 2015). Sin embargo, es importante considerar que factores como la capacidad del suelo para retener agua, precipitaciones y la evapotranspiración del lugar van a definir la cantidad de agua que requieren las lechugas (Blanco Moreno, 2019).

2.1.9 Indicadores de desempeño de un sistema de riego y fertirriego

Se considera que todo diseño e instalación de un sistema de riego debe tener una etapa final de evaluación con el fin de conocer la eficacia, distinguir posibles problemas y en cuyo caso, plantear recomendaciones para mejorar el sistema. Dos de los factores más importantes a evaluar en un sistema de riego por goteo son la presión y el caudal para lo cual existen coeficientes que permiten realizar esta evaluación tales como el coeficiente de uniformidad, coeficiente de distribución y el coeficiente de uniformidad de presiones (Rodríguez Bejarano, 2018).

2.1.9.1 Coeficiente de uniformidad (CU)

El objetivo de este coeficiente es conocer el comportamiento de aplicación de los goteros, es decir, evalúa la homogeneidad en cuanto a la cantidad de agua que brinda cada emisor al cultivo. Este método fue originado por J.E Christianssen, el cual se considera como aceptable cuando es mayor a 85% (Irrigation Australia, 2017). Algunas de las razones por las cuales pueden presentarse problemas con la uniformidad de los goteros son un inadecuado diámetro de la tubería, eficiencia de la bomba o inestabilidad en la presión suministrada (Williams Chavarría, 2011).

2.1.9.2 Coeficiente de Distribución (DU)

Este coeficiente realiza una comparación entre la lámina de riego promedio del 25% de los puntos muestreados que reciban la menor cantidad de agua respecto a la lámina promedio. El método fue creado por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA). El valor mínimo para que el sistema sea considerado con una distribución de riego adecuada es 80% (Irrigation Australia, 2017)

2.1.9.3 Coeficiente de Uniformidad de presiones (CU_p)

En los sistemas de riego presurizados es importante mantener un control adecuado sobre la presión que este recibe ya que su correcto funcionamiento depende en gran parte de este factor. Por ello, el coeficiente de uniformidad de presiones permite conocer si existen o no variaciones en la presión

dentro del mismo sistema de riego, de tal forma que se puede realizar correcciones en caso de ser requerido. Un valor de CU_p mayor a 90% indica un sistema operando en tema de presión correctamente, entre 80% y 90% se considera bueno, entre 70% y 80% es un rango aceptable y por debajo de 70% es inadmisibles (Rodríguez Bejarano, 2018).

2.1.9.4 Conductividad eléctrica (CE)

Aunque se añadan al inicio del sistema de riego las cantidades correctas de fertilizantes, es posible que ocurran algunos inconvenientes que no permitan una distribución correcta del fertirriego hasta las plantas. Por ello es importante verificar que las dosis de fertilizantes establecidas estén llegando tal cual hasta los emisores o en este caso, los goteros. Una forma de comprobar la correcta aplicación es mediante la medición de la conductividad eléctrica (CE) al inicio y final del sistema de fertirriego (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

La CE indica la cantidad de sales presentes en el agua, es decir, los iones inorgánicos disueltos los cuales mayoritariamente son cationes de calcio, magnesio, sodio y aniones de cloruro, sulfato y bicarbonato. Por lo tanto, al agregar fertilizantes al agua, la CE debe aumentar y debería ser la misma a lo largo del todo el trayecto en el sistema de fertirriego para asegurar que las plantas sí estén recibiendo la cantidad de nutrientes necesaria (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

2.2 Ciudad de los Niños

Institución de bien social y sin fines de lucro comprometida con la educación integral de jóvenes en situaciones de vulnerabilidad en Costa Rica. El proyecto inició gracias a los esfuerzos del padre Luis Madina Michelena en el año de 1958, quien tenía una fuerte preocupación por la calidad de vida de los niños que no contaban con un hogar. Sus esfuerzos comenzaron con un Hogar Dormitorio ubicado en San José y posteriormente, contó con la oportunidad de trasladar el hogar a una finca llamada “Finca la Jirara” con 136 hectáreas en Agua Caliente de Cartago, que actualmente pertenecen a la Ciudad de los Niños (Ciudad de los Niños, n.d.).

El desarrollo de este proyecto tuvo muchas dificultades por la falta de apoyo y la crítica situación que atravesaba el país en esos tiempos. Por lo anterior, el padre Luis Madina, en 1951, decide entregar la dirección a la Orden de Agustinos Recolectos, quienes a pesar de las adversidades lograron que esta institución se mantuviera estable. Esto mediante proyectos agrícolas para el autoabastecimiento, así como la venta de sus productos con el fin de generar ingresos. Poco a poco se fueron desarrollando otros proyectos de infraestructura tales como una escuela, talleres de ebanistería, mecánica, caminos, gimnasio, piscina, capillas, entre otros (Ciudad de los Niños, n.d.).

Asimismo, en 2007, se inauguró el Colegio Técnico Profesional San Agustín con el fin de fortalecer la parte académica de los niños y jóvenes que brinda servicio la institución, población que actualmente está conformada por 500 estudiantes con un rango de edad desde los 12 hasta los 18 años. Además, ofrecen distintas áreas de atención como psicología, orientación, formación espiritual, educación académica y técnica, actividades agropecuarias y lechería, entre otras (Ciudad de los Niños, n.d.).

3. Metodología

3.1 Descripción general

Para el diseño del sistema de riego se requiere una caracterización de las condiciones del sitio. Para ello se determinaron los parámetros que afectan la evapotranspiración de referencia en los sistemas de siembra, los cuales fueron determinados por medio del software de balance hídrico ET_0 Calculator de la FAO versión 3.2. Para el ambiente protegido, como datos de entrada del programa, se colocaron sensores de temperatura y humedad relativa (tipo HOBO) durante siete meses y para el campo abierto se utilizaron los datos de la estación meteorológica de Ciudad de los Niños. La infiltración del suelo se estimó mediante el método de infiltración de doble anillo para cada uno de los sistemas de siembra.

Por otra parte, se tomaron tres muestras aleatorias de suelo del campo abierto a 15 cm de profundidad con unos anillos de metal inoxidable las cuales se entregaron al Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) para determinar capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). Otras tres muestras de suelo en cada sistema fueron recolectadas para determinar la densidad aparente mediante el método de cilindros. En cuanto al caudal de la fuente de agua fue determinado por aforo en el sitio.

La determinación del sistema de fertirriego y su instalación requirieron de cálculos para los parámetros de riego tales como la evapotranspiración del cultivo, lámina neta, lámina bruta, frecuencia de riego, tiempo de riego, caudal teórico y el área de riego. Posteriormente se realizaron los planos en AutoCAD 2025 y se calcularon las pérdidas de carga por medio de Hazen-Williams. Por último, se aplicaron cuatro indicadores de desempeño del sistema de riego y fertirriego: coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU), coeficiente de distribución (DU), coeficiente de uniformidad de presiones (CU_p) y medición de conductividad eléctrica (CE).

3.2 Sitio de estudio

El presente trabajo será desarrollado en un ambiente protegido y en un campo abierto que se encuentran adyacentes uno del otro y están ubicados en la Ciudad de la Niños, Agua Caliente de Cartago, Costa Rica. Sus coordenadas corresponden a $9^{\circ}50'00''$ N y $83^{\circ}55'02''$ W con una altura de 1336 msnm. Según González Arroyo, S (2022) la zona cuenta con una temperatura media de 18 a 24 °C y precipitación que va desde los 1500 hasta los 2000 mm anualmente. Se cuenta con 10 meses efectivos para el crecimiento de flora (Murillo et al., 2016). Por otra parte, el lugar presenta una pendiente en 15 y 30% con suelos categorizados como inceptisoles (González Arroyo, 2022).

Cuenta con variedad de áreas para el aprendizaje y recreación de jóvenes que atienden. Sin embargo, para el presente trabajo cabe resaltar el ambiente protegido de 480 m² y un área de cultivo a campo abierto de 670 m² que se encuentra contiguo a este (Figura 1). Ambas zonas son destinadas

a la siembra de diversas hortalizas y son los lugares a los cuales es requerido implementar el sistema de fertirriego para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos.



Figura 1. Ambiente protegido y campo abierto ubicados en la Ciudad de los Niños, Cartago.

3.3 Caracterización del sitio y determinación del requerimiento hídrico del cultivo

La determinación de los diversos parámetros necesarios implicó el desarrollo de un proceso metodológico, el cual se presenta esquemáticamente en la Figura 2 y se describe con mayor profundidad más adelante.

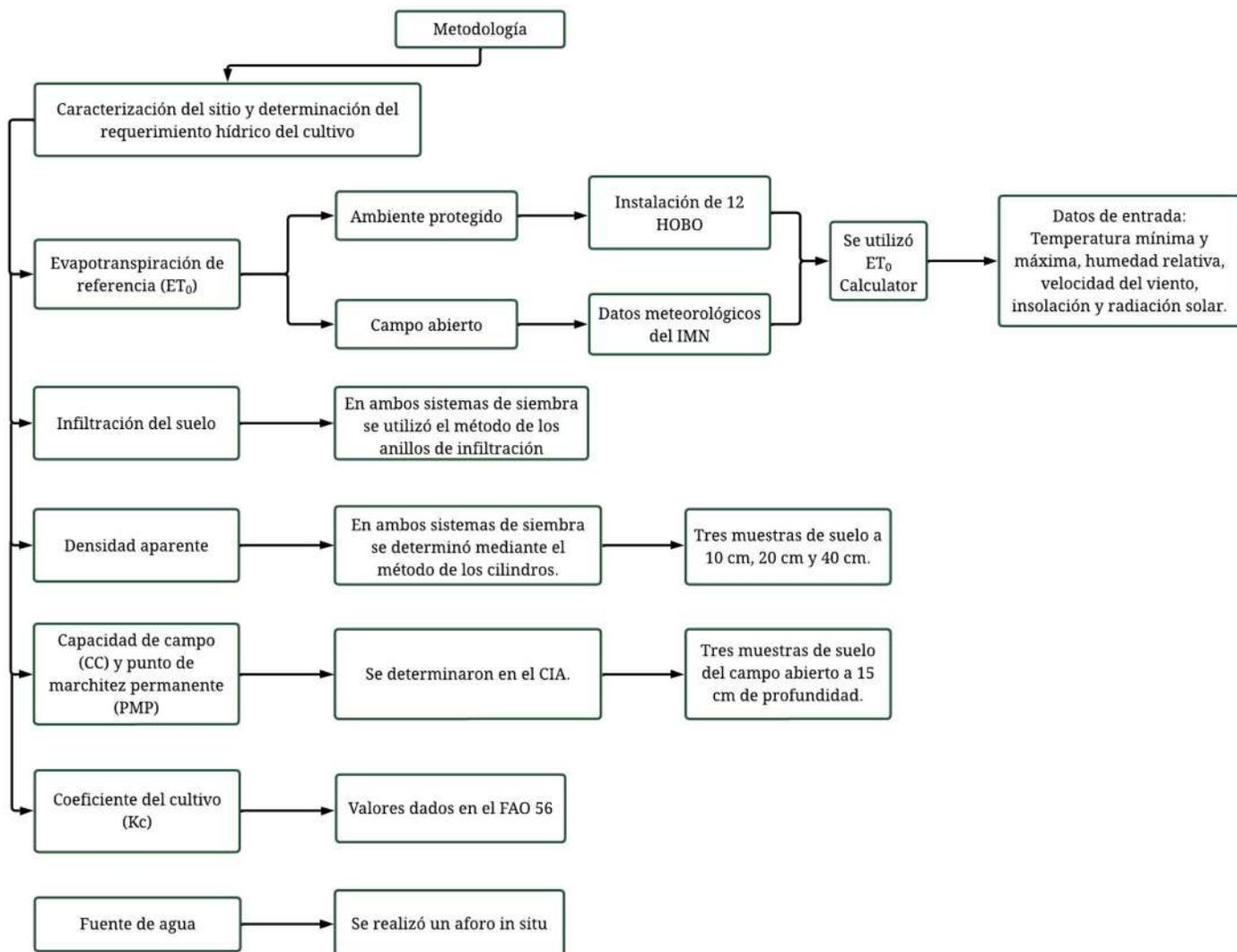


Figura 2. Esquema del desarrollo metodológico para la caracterización del sitio y determinación del requerimiento hídrico del cultivo.

3.3.1 Evapotranspiración de referencia (ET_0)

Se utilizó el programa informático libre ET_0 calculator de la FAO versión 3.2 para Windows con el fin de determinar la ET_0 de cada uno de los sistemas de siembra. Este programa requiere como datos de entrada la temperatura máxima y mínima en °C, el porcentaje de humedad relativa, la velocidad del viento en m/s, la insolación en hora/día y la radiación solar en MJ/m²-día, siendo todos datos mensuales.

En el caso del campo abierto, los datos de entrada de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar se obtuvieron de la Estación Automática Ciudad de los Niños, Paraíso, Cartago (latitud 9° 50' 3.00'', longitud 83° 55' 16.0'' y altitud 1338 m.s.n.m), la cual pertenece al Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Se realizó la solicitud al IMN para los datos mensuales

de temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa, velocidad de viento y radiación correspondiente a dicha estación desde septiembre del 2018 hasta mayo del 2023.

Para la insolación, la Estación Automática Ciudad de los Niños no cuenta con estos datos, por lo que se consultó al IMN por la estación más cercana a la Ciudad de los Niños que contara con estos datos, la cual correspondió a la estación ubicada en el distrito de Potrero Cerrado, cantón de Oreamuno (latitud $9^{\circ} 57' 15''$, longitud $83^{\circ} 51' 52''$ y altitud 3090 m.s.n.m). Los datos brindados, se promediaron por variable con el fin de obtener un dato por mes y utilizarlos como los datos de entrada del programa ET_0 calculator.

En el caso del ambiente protegido, se colocaron 12 registradores HOBO de temperatura y humedad relativa dentro de este desde el 19 de octubre del 2023 hasta el 24 de mayo del 2024 (aproximadamente siete meses) con el fin de obtener los datos para determinar la ET_0 . Se realizó un análisis de valores atípicos a los datos mensuales de temperatura máxima y mínima, así como al promedio de humedad relativa de cada uno de los registradores por medio del uso de RStudio. Este método determina si el valor es atípico cuando este está por arriba o abajo del cuantil tres en 1.5 por el rango intercuantil.

Una vez descartados los datos atípicos, con el propósito de completar los datos para un año se realizó una imputación múltiple por medio del método Predictive Mean Matching (PMM) con el programa de análisis estadístico RStudio. Finalmente, para ingresar los datos al programa ET_0 Calculator, se calcularon los promedios por mes de temperatura máxima y mínima, así como de la humedad relativa de los 12 registradores para obtener un dato mensual de cada una de las variables. Antes de colocar los registradores en el lugar, estos fueron calibrados mediante un método indirecto que consistió en colocar los registradores dentro de una cámara de refrigeración a $23^{\circ}C$ por 24 horas junto a un termómetro de mercurio al cual se le realizaron tres mediciones en diferentes momentos. Posteriormente, los registradores y el termómetro se trasladaron a otra cámara de refrigeración a $13^{\circ}C$ y se realizó el mismo procedimiento de la cámara anterior. Finalmente, se analizaron los datos de temperatura y humedad de todos los registradores por medio de un análisis de límites de tolerancia. Este tipo de análisis estadístico permite una selección específica de una población a partir de una confianza establecida que se integra por un límite inferior y uno superior (Hartnack y Roos, 2021). Se estableció utilizar una confianza del 95% respecto al dato de temperatura del termómetro de mercurio.

3.3.2 Infiltración del suelo

La infiltración del suelo se determinó para cada uno de los sistemas de siembra mediante el método de dobles anillos. Siguiendo la metodología utilizada por Béjar-Pulido et al., (2021), se realizó una prueba tanto en el ambiente protegido como en el campo abierto. Estos se incrustaron concéntricamente a una profundidad cercana a los 10 cm (Figura 3). Se agregó agua en el anillo

exterior hasta que este estuvo completamente cubierto y seguidamente se procedió a rellenar el anillo interior con agua manteniendo la precaución requerida para no disturbar el suelo.



Figura 3. Colocación de los anillos para la prueba de infiltración en el suelo en campo abierto de la Ciudad de los Niños.

Una vez se iniciaron las pruebas de infiltración, los datos se registraron en cm por minuto durante aproximadamente los primeros 30 minutos. Seguido, para el caso de la prueba en el campo abierto, se tomó una medición cada dos minutos por un periodo cercano a los 15 minutos mientras que, en el ambiente protegido, las mediciones se tomaron cada cinco minutos durante alrededor de 40 minutos. Por último, durante aproximadamente una hora, se realizaron mediciones cada 10 minutos en el ambiente protegido mientras que, en el campo abierto las mediciones se realizaron cada cinco minutos durante 20 minutos.

El agua infiltrada en el suelo se sustituyó cada vez que el nivel del agua en los anillos bajara a 10 cm vertiendo agua lentamente. Cada vez que se agregó agua al anillo interior, se consideró el cambio en la altura del agua. Finalmente, con los datos recolectados la tasa de infiltración se calculó mediante la ecuación [1]:

$$f(t) = \frac{\Delta I}{\Delta t} * 600 \quad [1]$$

Donde $f(t)$ es la tasa de infiltración [mm h^{-1}]; ΔI es la infiltración [cm]; Δt corresponde al tiempo durante la medición de infiltración [min] y 600 es el factor de conversión a mm h^{-1} (Béjar-Pulido et al., 2021).

3.3.3 Capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP)

Los parámetros de CC y PMP fueron determinados en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) mediante el análisis de retención de humedad (33 kPa y 1500 kPa) por medio de ollas de Richard. Para ello, se tomaron tres muestras de suelo del campo abierto a 15 cm de profundidad

con unos anillos de metal inoxidable de dimensiones de 1 cm de altura, 4.8 cm de diámetro interno y un grosor de pared de 0.15 cm. Se utilizaron estas medidas de los anillos debido a que el CIA lo solicita de esta forma para realizar las pruebas. Cabe mencionar, que solamente se llevaron muestras del campo abierto a causa de que solamente se contó con el presupuesto para una prueba. Se utilizaron los mismos datos de CC y PMP dados por el CIA tanto para campo abierto como para el ambiente protegido.

3.3.4 Densidad aparente

La densidad aparente fue determinada mediante el método de los cilindros, utilizado por Vargas González (2022). Se tomaron tres muestras de suelo a diferentes profundidades para cada uno de los sistemas de siembra: 10 cm, 20 cm y 40 cm. Las muestras fueron tomadas con los cilindros de la Escuela de Biosistemas de la UCR y posteriormente las muestras fueron llevadas al laboratorio de Aguas, Suelos y Ambiente de la Escuela de Biosistemas de la UCR donde se trasladaron las muestras a recipientes de aluminio que fueron pesados e introducidos en un horno marca TAISA a una temperatura de 105 °C por 24 horas. Una vez transcurrido este tiempo, las muestras se dejaron enfriar por aproximadamente una hora para luego pesar el suelo ya seco. Por medio de las ecuaciones [2] y [3] se calculó la densidad aparente:

$$Da = \left(\frac{P_{ss} - P_{cilindro} - P_{recipiente}}{V_{total}} \right) \quad [2]$$

Donde Da es la densidad aparente [g/cm^3], P_{ss} es el peso de suelo seco [g], $P_{cilindro}$ es el peso del cilindro [g], $P_{recipiente}$ es el peso del recipiente [g] y V_{total} es el volumen total del cilindro [cm^3] (Vargas González, 2022).

$$V_{total} = \pi r^2 h \quad [3]$$

Donde r es el radio del cilindro [cm] y h es la profundidad del cilindro [cm] (Vargas González, 2022).

3.3.5 Coeficiente del cultivo (K_c)

Para la determinación del K_c de los cultivos de tomate, cebolla y lechuga se tomaron como referencia los valores medios dados por la FAO de evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar.

3.3.6 Fuente de agua destinada al riego

El agua para el riego por goteo en los sistemas de cultivo de ambiente protegido y campo abierto es suministrada por una red de distribución interna de la Ciudad de los Niños. La fuente principal proviene de un pozo el cual se encuentra a una altura aproximada de 100 m respecto a la ubicación del área de cultivo. Esta misma red también abastece otras necesidades hídricas agrícolas de la institución, incluyendo la lechería y la pollería. Para determinar el caudal disponible para estos sectores de riego, se realizó un aforo in situ. Este proceso consistió en tres mediciones consecutivas

de volumen, efectuadas mediante un recipiente y un cronómetro directamente en la tubería principal que alimenta ambas áreas de cultivo.

3.4 Determinación de sistema de riego y su implementación

La consecución del segundo objetivo se llevó a cabo siguiendo la metodología presentada en la Figura 4 y desarrollada en apartados subsiguientes.

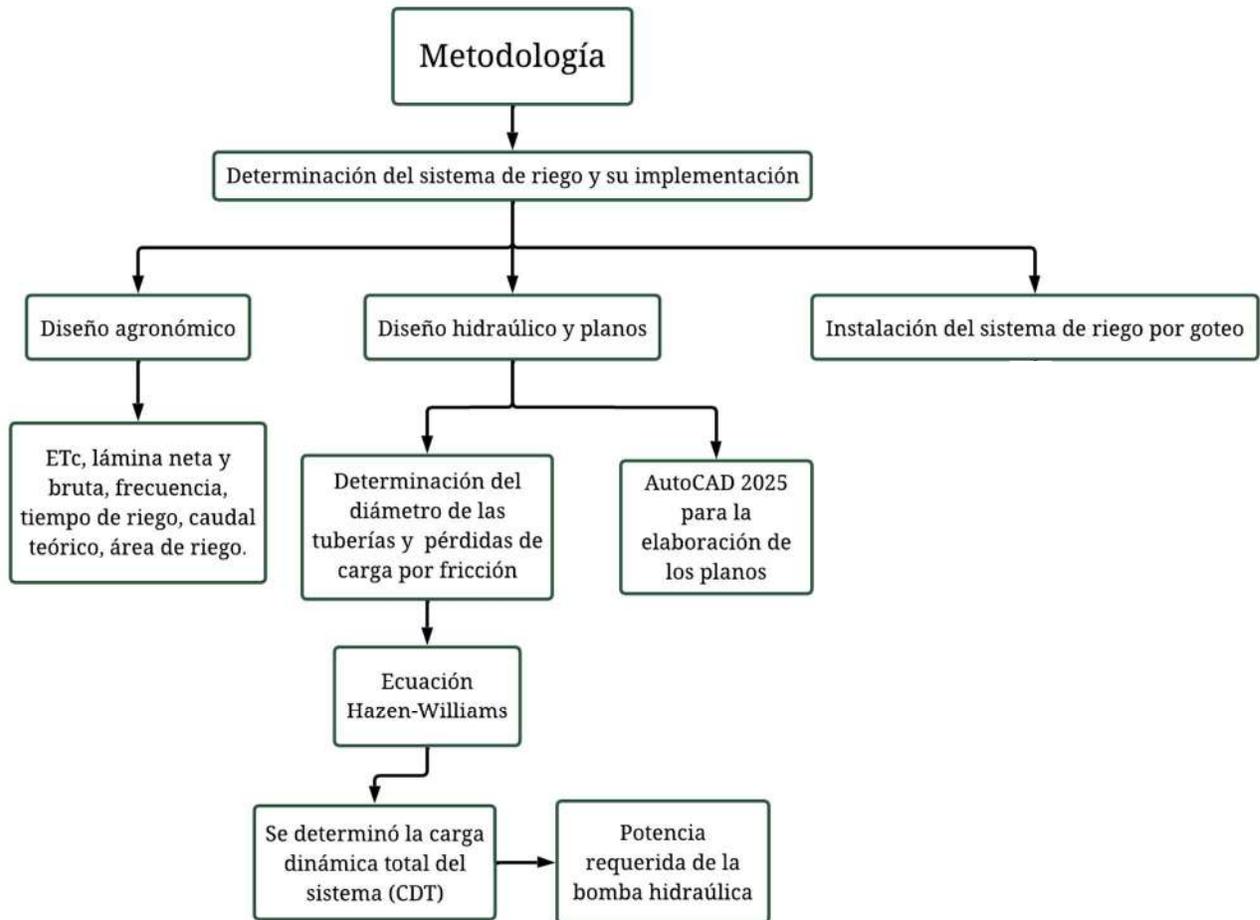


Figura 4. Esquema del desarrollo metodológico para la determinación del sistema de riego y su implementación.

3.4.1 Diseño agronómico

Para el diseño de riego por goteo se determinaron todos los parámetros de riego requeridos con una metodología similar a la utilizada por Quirós Valverde (2019). En ella se determinan los valores de la evapotranspiración del cultivo, lámina neta, lámina bruta, frecuencia de riego, tiempo de riego, caudal teórico y el área de riego. Las ecuaciones que se utilizaron se detallan en el apéndice A, apartado tres.

3.4.2 Diseño hidráulico y planos

El diseño de los planos del sistema de riego por goteo, tanto para el ambiente protegido como para campo abierto, se llevó a cabo utilizando AutoCAD 2025. Complementariamente a estos diseños, se realizaron los cálculos hidráulicos: las pérdidas de carga por fricción en las tuberías se estimaron aplicando la ecuación de Hazen-Williams [4]:

$$H_f = \frac{10,674 * Q^{1,852} * L}{C^{1,852} * D^{4,871}} \quad [4]$$

Donde H_f es la pérdida de carga [mca], Q es el caudal [m^3/s], L es la longitud de la tubería [m], C es el coeficiente de rugosidad de la tubería y D es el diámetro interno de la tubería [m] (Alegret Breña y Martínez Valdés, 2019).

La selección de la bomba hidráulica idónea para el sistema propuesto se fundamentó en cuatro parámetros críticos: el caudal requerido, la carga dinámica total, el NPSH (Net Positive Suction Head) disponible y la eficiencia operativa. Inicialmente, se llevó a cabo una búsqueda de catálogos de proveedores nacionales. Posteriormente, se seleccionó la bomba mediante el análisis de sus curvas características, verificando que cumpliera con los requisitos de caudal y carga dinámica total, y corroborando que el NPSH disponible en el sistema (determinado mediante la ecuación [5]) fuera superior al requerido por la bomba, garantizando así un funcionamiento óptimo y la prevención de cavitación.

$$NPSH_{disp} = P_{atm} + h_s - h_f - P_v \quad [5]$$

Donde $NPSH_{disp}$ es la altura neta de succión positiva disponible [mca], P_{atm} es la presión atmosférica [mca], h_s es la altura desde el nivel del líquido hasta el eje de la bomba [m], h_f son las pérdidas por fricción en la tubería de succión y P_v es la presión de vapor del agua [m] (Barker, 2018).

Además, se determinó la carga dinámica total (CDT) requerida para el correcto funcionamiento del sistema, lo que permitió definir la potencia de la bomba necesaria para lo cual se utilizó la ecuación [6]. Los materiales e insumos necesarios para la implementación de este diseño fueron financiados por la Ciudad de los Niños.

$$P = \frac{1.1 \cdot CDT \cdot Q}{2.7 \cdot 75} \quad [6]$$

Donde CDT es la carga dinámica total [mca] y Q es el caudal [m^3/s] (Sánchez Pérez et al., 2014).

3.4.3 Instalación del sistema de riego por goteo

Se instaló un sistema de riego por goteo utilizando los materiales y equipos especificados en el diseño, complementando elementos ya existentes en el cabezal de riego. Durante la instalación, se añadieron una válvula ventosa antes de la bomba y un manómetro después del filtro de anillos.

También se reubicaron algunas válvulas de bola para optimizar el flujo de agua. No obstante, en el sector de hidroponía, la instalación del sistema de riego no logró completarse debido a la ausencia de las estructuras para el cultivo (bancales) requeridas para la siembra de la lechuga. Ante esta limitación, se instaló la tubería principal previendo las conexiones necesarias para facilitar la conclusión de la instalación una vez se disponga de los materiales faltantes.

3.5 Evaluación del desempeño del sistema de riego diseñado e implementado

Se aplicaron cuatro indicadores del desempeño de riego y fertirriego para evaluar el diseño y la instalación del mismo en el ambiente protegido y el campo abierto (Figura 5). El primero de ellos es el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU), el segundo el coeficiente de distribución (DU), el tercero es el coeficiente de uniformidad de presiones (CU_p) y por último la medición de conductividad eléctrica.

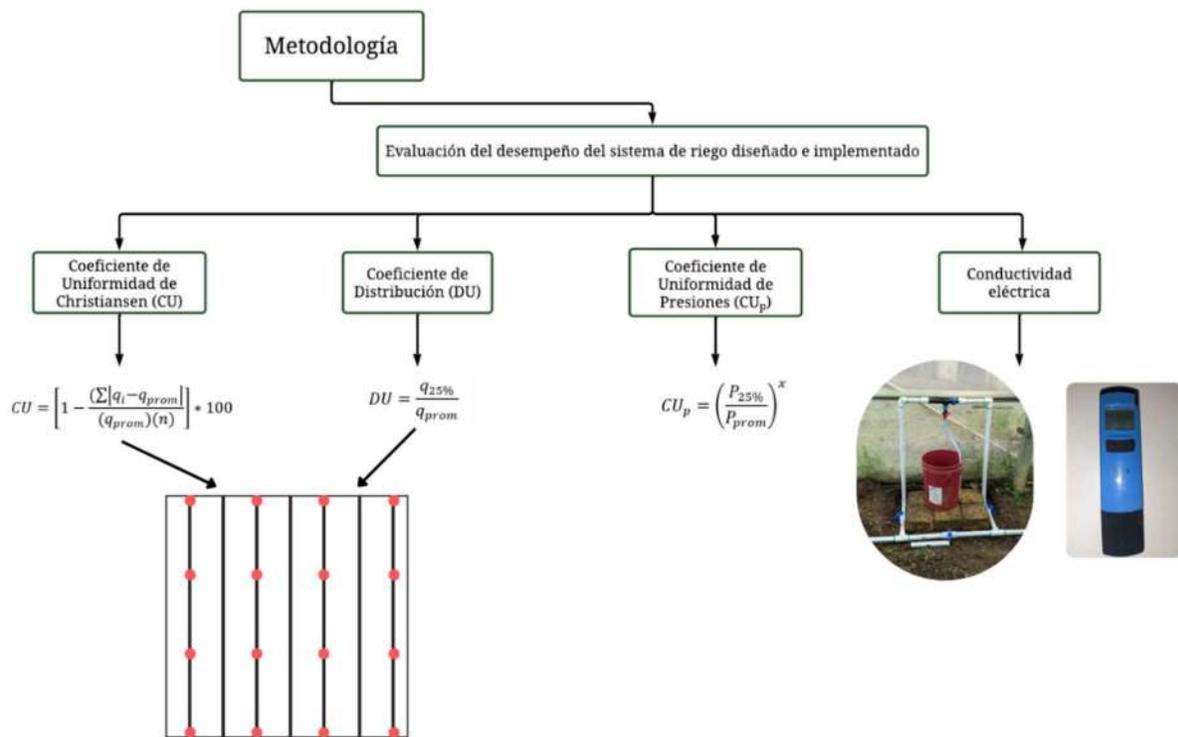


Figura 5. Esquema del desarrollo metodológico para la evaluación del desempeño del sistema de riego diseñado e implementado.

3.5.1 Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CU) y Coeficiente de Distribución (DU)

Para la recolección de los datos de caudal por emisor se procedió a seguir la metodología que PROSAP (2016) indica. Se dividió el área de riego según cuantas válvulas haya, es decir, en cuatro, y luego se midió el caudal en el primer emisor del lateral, a 1/3, 2/3 y en el último emisor (Figura 5). Para ello se colocaron recipientes debajo de los goteros correspondientes (Figura 6).



Figura 6. Recolección de agua de riego emitida por un gotero para la determinación del CU en la Ciudad de la Niños, Cartago.

Esta secuencia entre los emisores de los laterales se realizó de la misma forma, pero para cada lateral. Las mediciones se realizaron activando el riego durante un rango de 3 a 4 minutos (previamente se confirmó que el sistema alcanzara la presión nominal de trabajo) y posteriormente se midió la cantidad de agua de cada recipiente con una probeta. Se realizaron tres repeticiones por gotero de medición. Una vez obtenido estos datos para el ambiente protegido y el campo abierto se utilizó la ecuación [6] para conocer el CU y [7] para el DU:

$$CU = \left[1 - \frac{(\sum |q_i - q_{prom}|)}{(q_{prom})(n)} \right] * 100 \quad [6]$$

Donde CU es el coeficiente de uniformidad [%], q_i es el caudal individual de los goteros muestreados [l/h] y q_{prom} es el caudal promedio de todas las mediciones [l/h] y n es el número de goteros aforados (Cun et al., 2012).

$$DU = \frac{q_{25\%}}{q_{prom}} \quad [7]$$

Donde DU es el coeficiente de distribución [%] y $q_{25\%}$ es el promedio del 25% de las lecturas menores de caudal [l/h] (Cun et al., 2012).

3.5.2 Coeficiente de uniformidad presiones (CU_p)

Según PROSAP (2016), los mismos puntos donde se realice la medición de caudal para el CU, se deben realizar las mediciones de presión. Para llevar a cabo la medición de presión en el punto medio de la cinta de goteo, fue necesario realizar un corte en la cinta. Esta acción permitió la inserción del equipo de medición y la obtención de datos. Estas mediciones se realizaron con un manómetro (Figura 7) y se aseguró que el lateral esté completamente en el suelo para una correcta lectura.



Figura 7. Medición de la presión en un lateral de riego por medio de un manómetro para la determinación del CU_p en la Ciudad de la Niños, Cartago.

La ecuación que se utilizó para determinar el CU_p es la [8]:

$$CU_p = \left(\frac{P_{25\%}}{P_{prom}} \right)^x \quad [8]$$

Donde CU_p es el coeficiente de uniformidad de presiones, $P_{25\%}$ es la presión promedio del 25% de las mediciones menores [kg/cm^2], P_{prom} es el promedio de todas las mediciones [kg/m^2] y x es el exponente de descarga del emisor (PROSAP, 2016).

3.5.3 Conductividad eléctrica (CE)

Se realizaron tres mediciones de la conductividad eléctrica (CE) del agua de riego previo a cualquier adición de fertilizante. Posteriormente, se preparó una solución nutritiva experimental con 500 g de sulfato de magnesio (MgSO_4) y 500 g de fosfato monopotásico (KH_2PO_4) disueltos en cuatro litros de agua. Para la recolección de muestras, se colocaron tres recipientes bajo emisores estratégicamente ubicados: uno al inicio de la primera cinta de goteo, otro en la mitad de una cinta central y el tercero al final de la última cinta de goteo. Tras activar el riego, y después de 30 segundos, se incorporó la solución al sistema mediante el Venturi. El riego se suspendió una vez agotada toda la solución nutritiva del tanque de mezcla. Finalmente, se midió la conductividad eléctrica de la solución recolectada en cada recipiente utilizando un medidor marca HANNA modelo HI98304.

4. Resultados

4.1 Caracterización del sitio y determinación del requerimiento hídrico del cultivo

La caracterización del sitio de estudio comprendió el cálculo o medición de los parámetros de evapotranspiración de referencia (ET_0), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), infiltración del suelo y densidad aparente del suelo.

4.1.1 Evapotranspiración de referencia (ET_0)

Por medio del programa informático “ ET_0 Calculator” de la FAO se obtuvieron los valores de la ET_0 mensuales para el ambiente protegido (Cuadro 2) como para el campo abierto (Cuadro 3) a partir de datos recopilados de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. En el caso del ambiente protegido, se obtuvo una ET_0 mínima, máxima y promedio de 2.2 mm/día en el mes de diciembre, 2.9 mm/día en marzo y 2.6 mm/día respectivamente. Por otra parte, para el campo abierto, se obtuvieron valores de 3.0 mm/día en los meses de noviembre y diciembre, 4.1 mm/día en el mes de marzo y 3.5 mm/día, correspondientes respectivamente al valor mínimo, máximo y promedio de ET_0 . Para el diseño de riego, se utilizaron los valores promedios de cada uno de los sistemas de siembra.

Cuadro 2. ET_0 correspondiente al ambiente protegido determinado mediante ET_0 Calculator.

Año	Mes	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Insolación (hora/día)	Radiación solar (MJ/m ² .día)	ET ₀ (mm/día)
2023	Octubre	38.0	16.2	78.7	0.0	4.30	12.2	2.7
2023	Noviembre	37.5	15.4	81.0	0.0	4.91	11.0	2.4
2023	Diciembre	33.8	12.4	78.6	0.0	6.55	11.4	2.2
2024	Enero	34.2	11.8	76.3	0.0	7.03	12.2	2.4
2024	Febrero	37.5	10.6	77.5	0.0	8.16	13.7	2.7
2024	Marzo	39.9	6.7	72.1	0.0	8.87	14.8	2.9
2024	Abril	37.0	8.7	72.1	0.0	5.23	14.0	2.8
2024	Mayo	36.8	14.0	73.3	0.0	3.97	12.1	2.6
2024	Junio	38.3	16.0	76.3	0.0	2.58	11.4	2.4
2024	Julio	37.3	16.0	75.9	0.0	2.93	11.2	2.4
2024	Agosto	40.0	15.9	77.3	0.0	3.88	12.3	2.6
2024	Setiembre	37.3	16.1	75.3	0.0	4.17	12.7	2.7
	Promedio	37.3	13.3	76.2	0.0	5.2	12.4	2.6

Cuadro 3. ET_0 correspondiente al campo abierto determinado mediante ET_0 Calculator. Se muestran los valores para los meses del año y el comportamiento de los parámetros climáticos que rigen el ET_0

Mes	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Insolación (hora/día)	Radiación solar (MJ/m ² .día)	ET ₀ (mm/día)
Enero	24.3	13.4	83.8	3.1	7.03	18.4	3.3
Febrero	25.2	13.8	82.8	3.3	8.16	20.6	3.8
Marzo	25.0	13.7	82.4	3.1	8.87	22.3	4.1
Abril	25.8	15.1	83.8	2.5	5.23	21.1	4.0
Mayo	26.7	16.4	86.4	2.1	3.97	18.2	3.6
Junio	26.6	16.2	87.5	2.0	2.58	17.1	3.4
Julio	26.5	16.1	87.0	2.4	2.93	16.8	3.4
Agosto	25.6	15.9	87.0	2.0	3.88	18.6	3.5
Setiembre	25.9	15.3	86.2	1.8	4.17	19.1	3.6
Octubre	25.4	15.4	87.0	1.8	4.30	18.3	3.4
Noviembre	24.6	15.3	87.8	2.3	4.91	16.6	3.0
Diciembre	23.4	13.9	86.0	2.9	6.55	17.2	3.0
Promedio	25.4	15.0	85.6	2.4	5.2	18.7	3.5

4.1.2 Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)

Los valores de la CC y el PMP del suelo en la Ciudad de los Niños, obtenidos del laboratorio de recursos naturales del CIA son 43% y 35% respectivamente, dando un valor de contenido de humedad del suelo (agua disponible) de 8%.

4.1.3 Densidad aparente

Por medio del método de los cilindros, se logró determinar la densidad aparente del suelo del ambiente protegido y del campo abierto. Los resultados se muestran en la figura 8 donde se ilustra la relación de la densidad aparente contra la profundidad del suelo. En el caso del campo abierto se obtuvieron valores promedio de 1.22 g/cm³ para 10 y 20 cm de profundidad y 1.05 g/cm³ para 40 cm de profundidad. Por otra parte, para el ambiente protegido se obtuvo 1.06, 1.21 y 1.12 g/cm³ para 10, 20 y 40 cm de profundidad respectivamente.

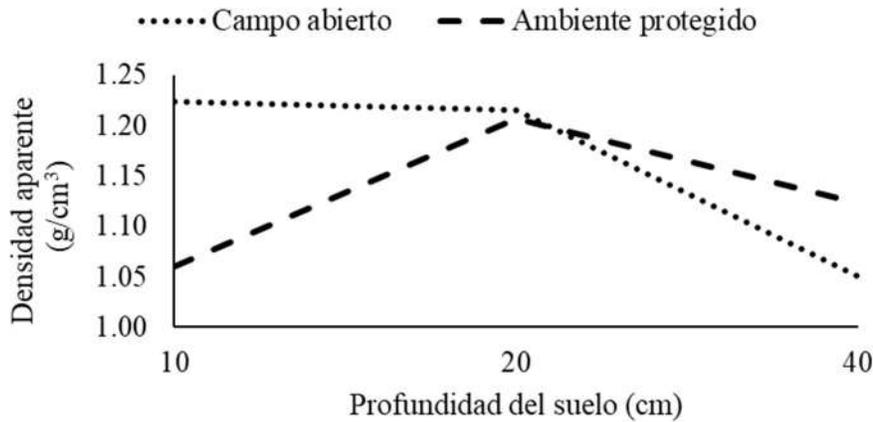


Figura 8. Valores de densidad aparente determinado mediante el método de los cilindros vs profundidad del suelo en campo abierto y en ambiente protegido.

4.1.4 Infiltración del suelo

Al realizar las pruebas de infiltración de doble anillo, se logró observar que, para ambos sistemas de siembra, el agua llegó a una tasa de infiltración de 1.10 mm/min para campo abierto y 1.00 mm/min para ambiente protegido, luego de aplicar la ecuación de Kostiakov (ver figura 9).

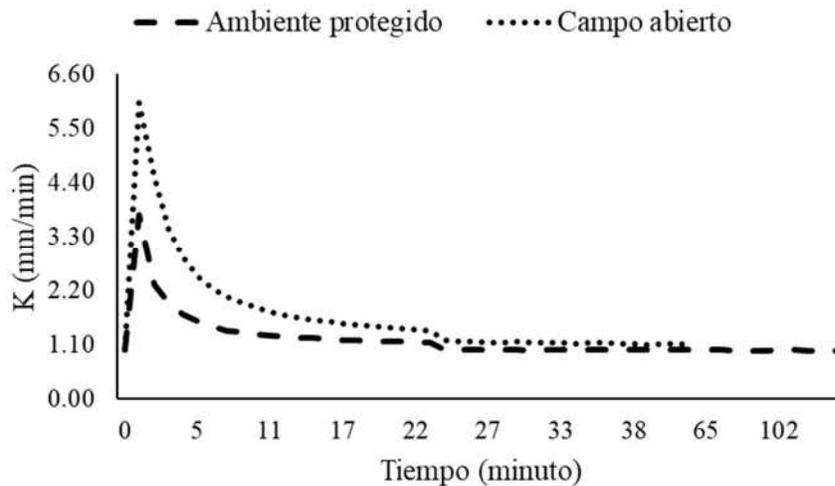


Figura 9. Valores de conductividad hidráulica vs tiempo de infiltración determinado mediante la ecuación de Kostiakov en ambiente protegido y en campo abierto.

4.1.5 Coeficiente del cultivo (K_c) y fuente de agua destinada al riego

Se muestra en el cuadro 4, los valores de K_c para la etapa fenológica media de los cultivos de tomate, cebolla y lechuga. Asimismo, se determinó que el caudal disponible para el riego y fertirriego es de $4.17 \pm 0.19 \text{ m}^3/\text{h}$.

Cuadro 4. Coeficiente del cultivo (K_c) para la etapa fenológica media, correspondiente al tomate, cebolla y lechuga. Tomado de Allen et al., (1998).

Cultivo	$K_{C\ med}$
Tomate	1.15
Cebolla	1.00
Lechuga	1.05

4.2 Determinación del sistema de riego y su implementación en campo

El sistema de riego por goteo fue determinado mediante la elaboración de un diseño agronómico e hidráulico, así como la elaboración de planos que indican la distribución espacial de cada componente. A continuación, se detallan los resultados obtenidos de esta sección:

4.2.1 Diseño agronómico

Los parámetros de diseño esenciales para el sistema de riego por goteo se establecieron a partir de datos recopilados sobre el clima, las propiedades del suelo y los requerimientos hídricos de los cultivos. Estos parámetros agronómicos clave se detallan en el cuadro 5 para cada tipo de cultivo trabajado.

Cuadro 5. Valores calculados de los parámetros utilizados en la programación de riego por goteo, separados por cultivo, en ambiente protegido y campo abierto ubicados en la Ciudad de los Niños.

Parámetro	Tomate	Lechuga hidropónica	Lechuga	Cebolla
Et _c (mm/día)	2.99	2.60	3.50	3.50
Separación entre centro de camas/lomillos (m)	0.70	2.00	1.00	1.00
Separación entre plantas (m)	0.40	0.15	0.20	0.20
Profundidad de raíz (m)	0.40	0.20	0.20	0.20
Agotamiento (%)	10.00	15.00	21.00	22.00
Frecuencia (día)	1.00	1.00	1.00	1.00
Lámina neta (mm)	3.58	2.69	3.53	3.70
Lámina bruta (mm)	3.77	2.83	3.71	3.89
Precipitación por gotero (mm/h)	5.24	14.67	7.33	7.33
Tiempo total de riego (minutos)	43.21	11.58	30.38	31.83
Pulsos de riego (3 veces al día) (minutos)	14.40	3.86	10.13	10.61
Caudal total requerido (m ³ /h)	1.26	1.47	1.98	2.93

4.2.2 Diseño hidráulico

Con base en los parámetros agronómicos establecidos, se procedió al diseño hidráulico, determinando mediante cálculos los diámetros de las tuberías principal y secundaria, así como la presión inicial del sistema necesaria para asegurar la presión de funcionamiento adecuada en las cintas de goteo. Adicionalmente, se calcularon las pérdidas de carga por fricción en las tuberías y se verificó que la variación entre tramos no excediera el 20%. La totalidad de estos cálculos se detalla en la memoria de cálculo, la cual se encuentra en los Anexos (cuadro 15 hasta el cuadro 19).

En el cuadro 6 se detallan las pérdidas de carga por fricción de las tuberías y accesorios que integran el sistema de riego. El cálculo de estas pérdidas fue fundamental en la determinación de la carga dinámica total y potencia mínima requerida para el funcionamiento óptimo del sistema, las cuales resultaron en 38.78 mca y 0.62 HP respectivamente. Las pérdidas menores por accesorios se detallan en el cuadro 20 de anexos.

Cuadro 6. Determinación de la potencia requerida para el funcionamiento óptimo del sistema de riego por goteo en la Ciudad de los Niños, Cartago. (Hf: Pérdida de carga por fricción)

Parámetro	Valor	Unidad
Hf Filtros anillos	5	mca
Hf Principal	1.38	mca
Hf Accesorios	0.38	mca
Hf Lateral	0.02	mca
Hf Divisor	0.01	mca
Hf Válvula	2	mca
Venturi	20	mca
Presión gotero	10	mca
Carga dinámica total (CDT)	38.78	mca
Caudal	2.93	m ³ /h
CDT Disponible	13.78	mca
Potencia	0.62	HP

4.2.3 Planos de diseño y materiales

Se muestra en la Figura 10 la distribución espacial del área de siembra conformada por un ambiente protegido y campo abierto, así como la ubicación del cabezal de riego y la bodega en la Ciudad de los Niños.

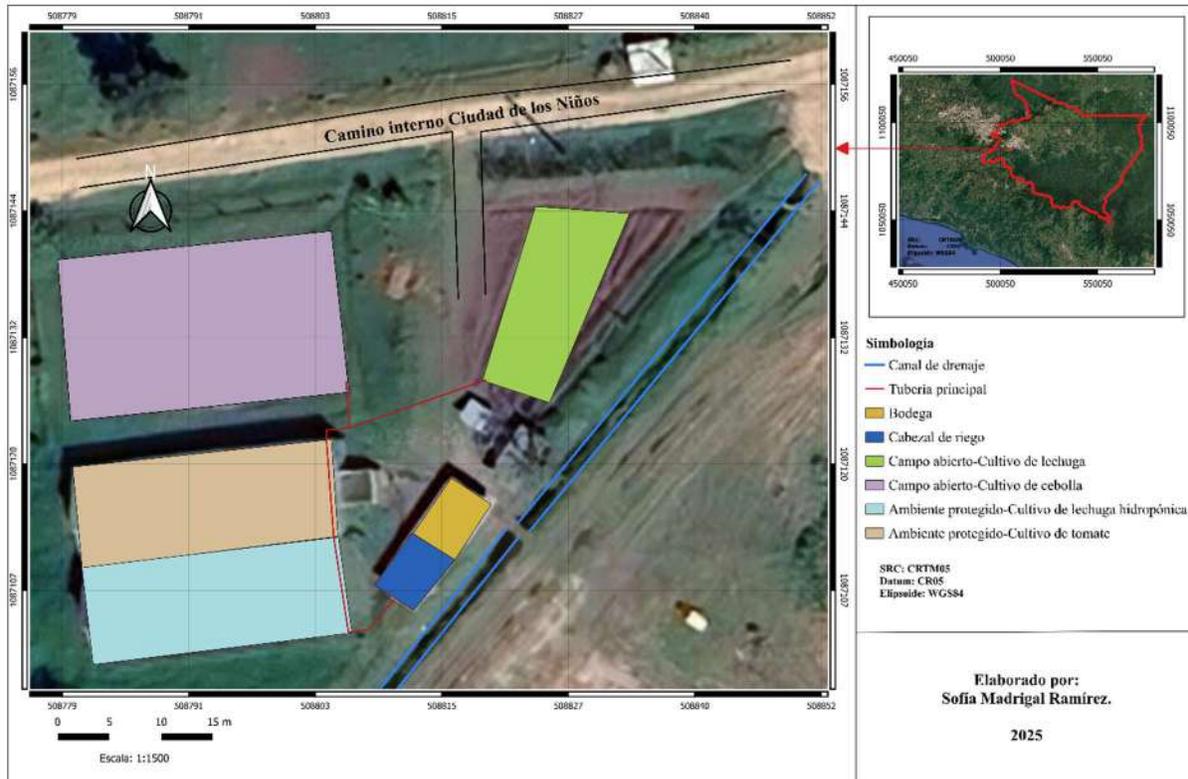


Figura 10. Distribución general de los lotes de siembra de hortalizas en la Ciudad de los Niños, Cartago, donde se implementó el sistema de riego por goteo diseñado. Elaboración propia (QGIS versión 3.34.11, 2025).

La ubicación de las tuberías (principal, secundaria y cintas de goteo), así como la disposición de las válvulas de bola, las cuales permiten el control individualizado del riego en cada sector de siembra en función del cultivo, así como la ubicación de la bomba donde se localiza el cabezal de riego (Figura 15) y orientación de los laterales de riego se visualizan en la Figura 11. En dicha figura, se aprecian los puntos de ingreso del agua a los distintos lotes del sistema.

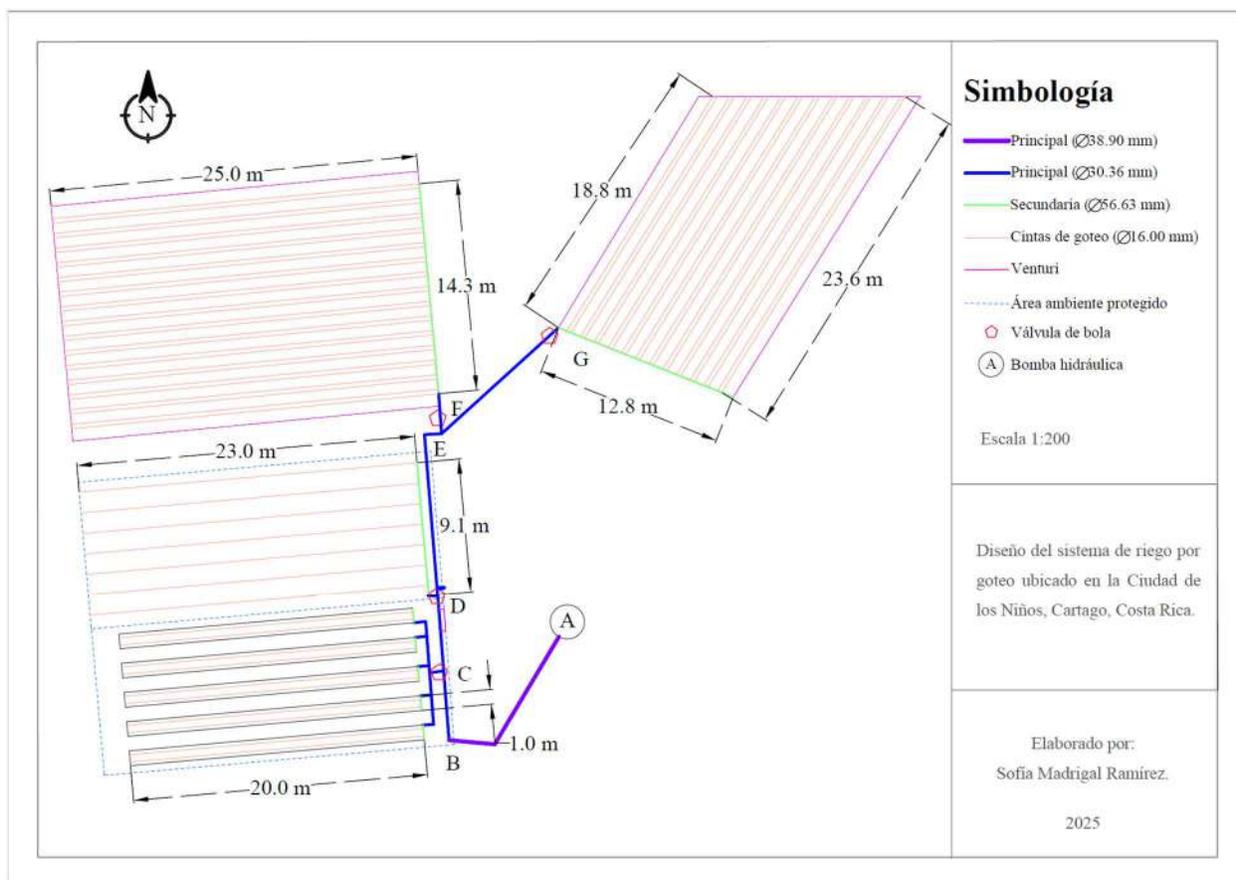


Figura 11. Plano de distribución de tuberías primarias, secundarias y cintas de goteo en los distintos lotes de siembra para la implementación del riego por goteo en la Ciudad de los Niños, Cartago. Elaboración propia en el programa AutoCAD, versión 2025.

La Figura 12 presenta el plano del sistema de riego por goteo diseñado para el ambiente protegido. Esta área se subdivide en dos secciones, destinando una mitad al cultivo de tomate en suelo por lomillos y la otra mitad a la lechuga hidropónica en bancales. A pesar de que la institución aún no dispone de las estructuras requeridas para el cultivo hidropónico al momento de la instalación de las tuberías, se diseñó y se representó en este plano la distribución espacial del sistema de riego para este sector, con el fin de facilitar su futura instalación. Asimismo, se aprecia la ubicación del equipo de inyección de fertilizantes, el cual provee los nutrientes tanto al tomate en el ambiente protegido, así como a los dos lotes que se encuentran en campo abierto.

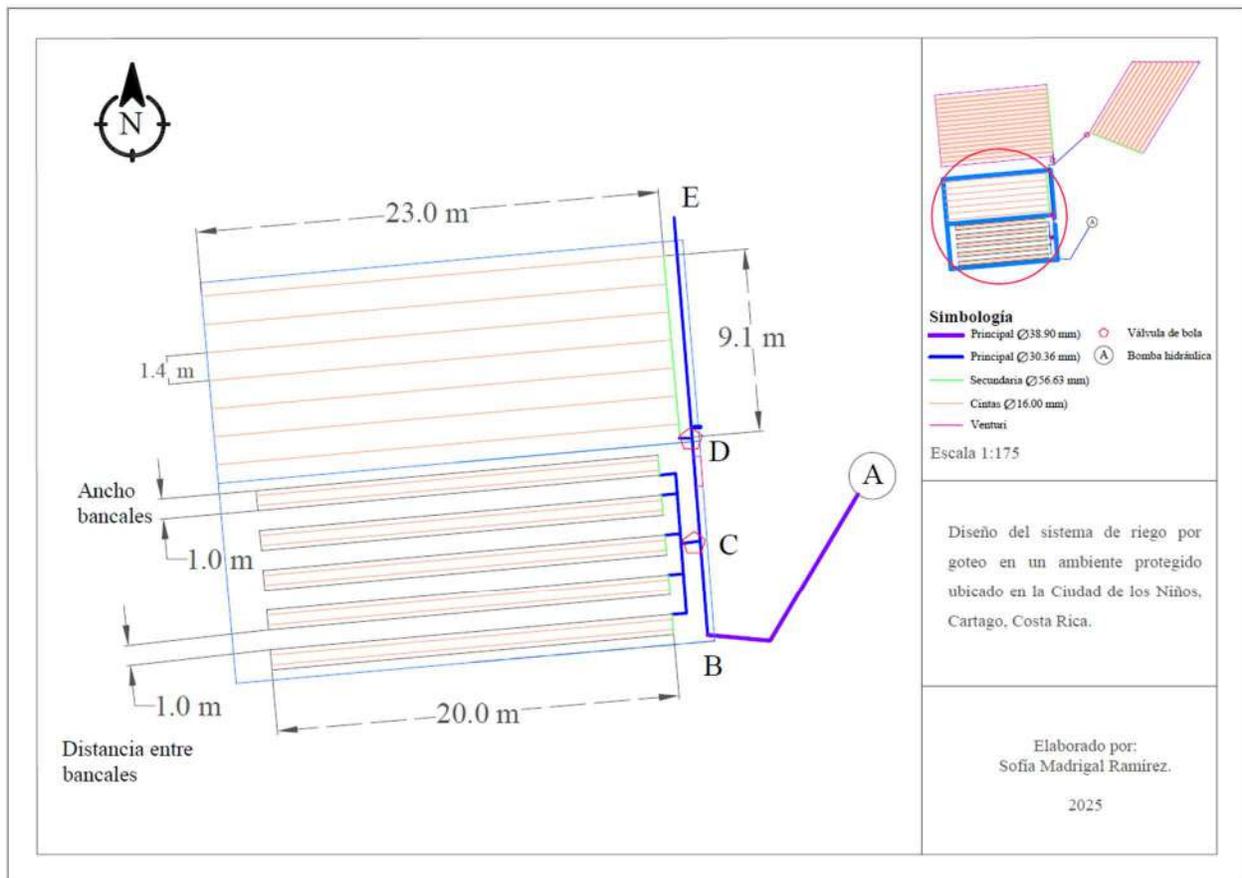


Figura 12. Plano de distribución de tuberías primarias, secundarias y cintas de goteo en el ambiente protegido para la implementación del riego por goteo en la Ciudad de los Niños, Cartago. Elaboración propia en el programa AutoCAD, versión 2025.

Por otra parte, la Figura 13 presenta la distribución del sistema de riego por goteo en el área de campo abierto, específicamente para el cultivo de cebolla en camas de un ancho de 0.6 m con desagües de 0.40 m. En este se detalla la recomendación de utilizar dos cintas de goteo por cama, con una separación de 30 cm entre ellas (como se indica en la sección 5.2.1). Además, el diseño incluye una válvula de bola para el riego individualizado de esta área.

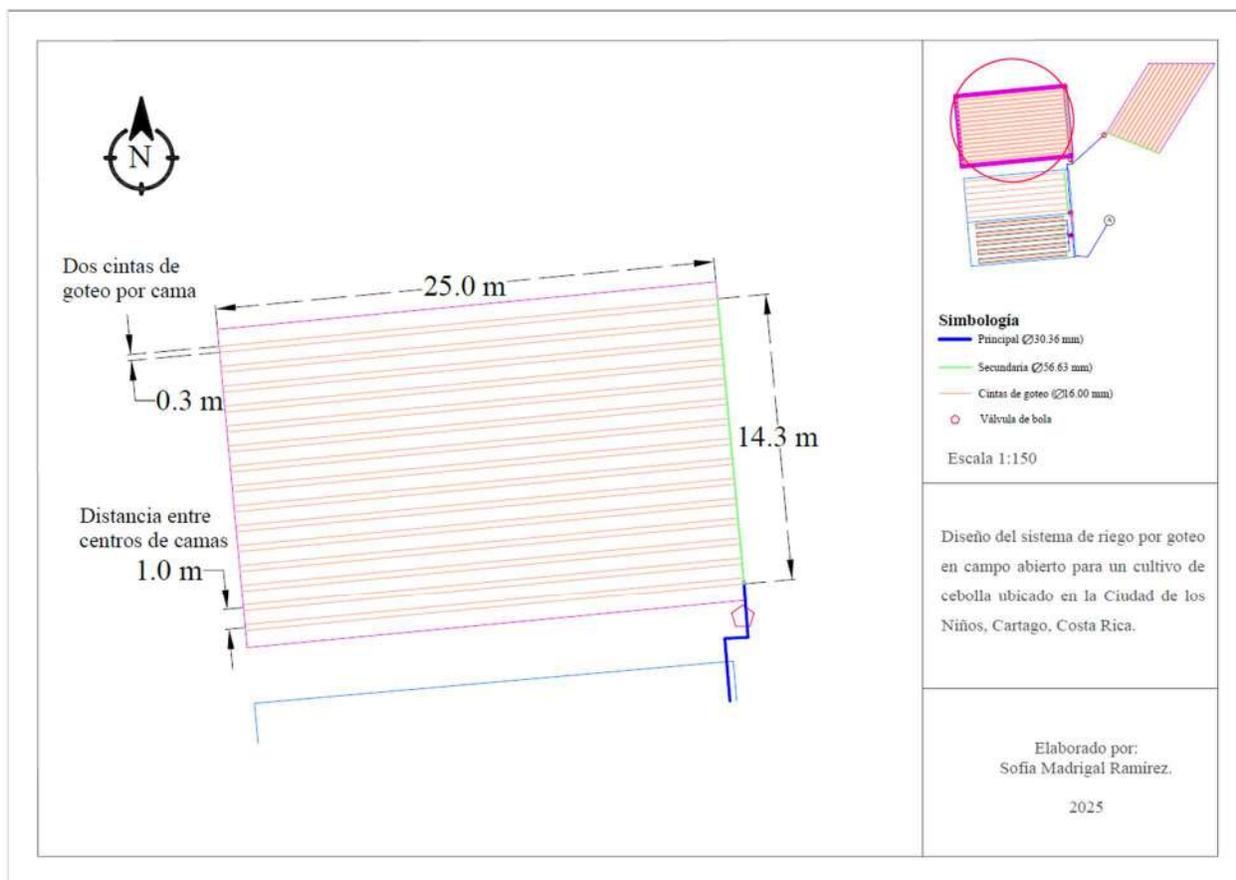


Figura 13. Plano de distribución de tuberías primarias, secundarias y cintas de goteo en campo abierto destinado a la siembra de cebolla para la implementación del riego por goteo en la Ciudad de los Niños, Cartago. Elaboración propia en el programa AutoCAD, versión 2025.

La distribución del sistema de riego por goteo del área a campo abierto con el cultivo de lechuga en suelo se visualiza en la figura 14. Al igual que el campo abierto con cultivo de cebolla, en este se recomienda la colocación de dos cintas de goteo por cama con una separación de 30 cm entre ellas. Las camas de siembra tienen un ancho de 0.6 m con desagües de 0.4 m, resultando en una distancia entre centros de camas de 1 m.

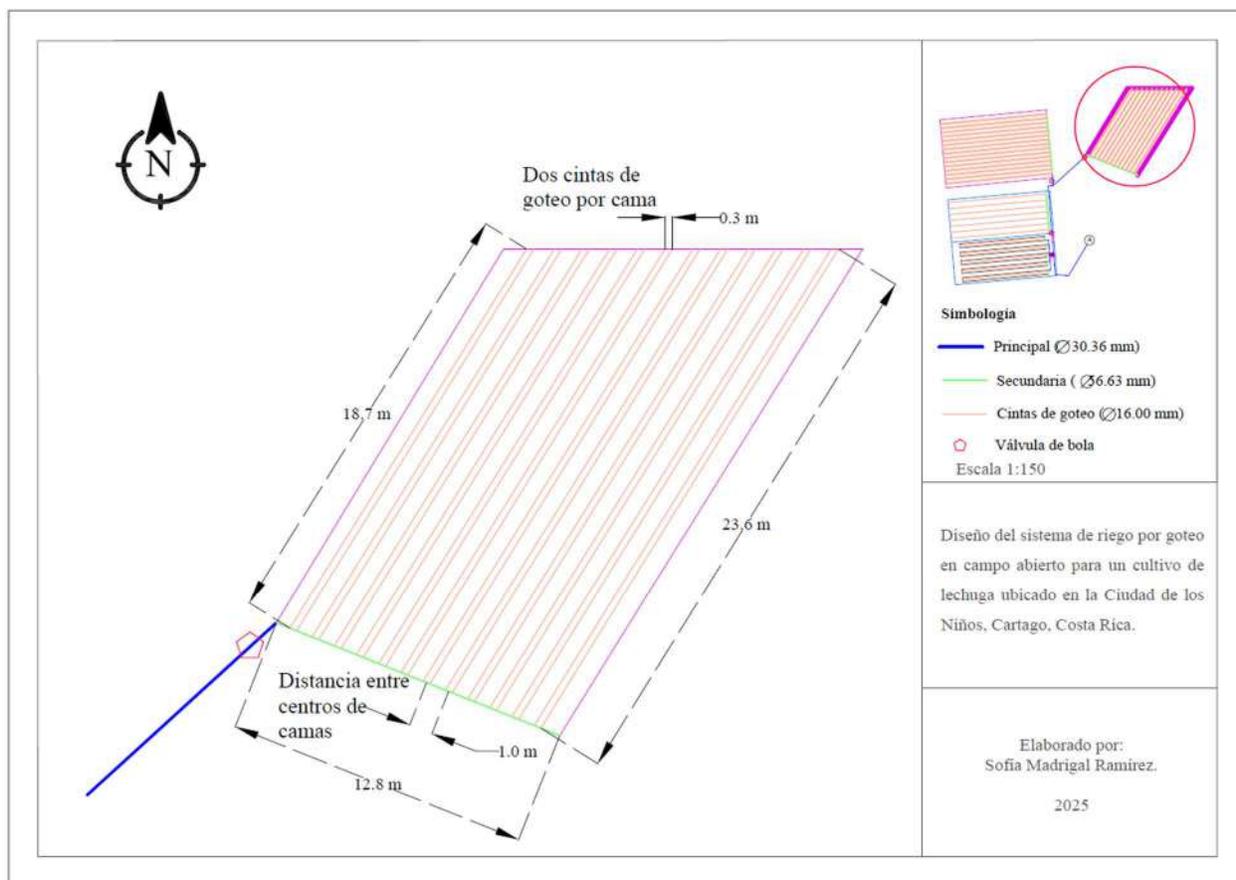


Figura 14. Plano de distribución de tuberías primarias, secundarias y cintas de goteo en campo abierto destinado a la siembra de lechuga para la implementación del riego por goteo en la Ciudad de los Niños, Cartago. Elaboración propia en el programa AutoCAD, versión 2025.

El cabezal de riego del sistema diseñado e implementado en la Ciudad de los Niños se presenta en la figura 15. Este está compuesto por una bomba hidráulica Pearl modelo JSP 10F16S con una potencia de 1 hp y un rango de caudal de trabajo de 10 a 60 L/min; el diseño del sistema se ajustó a esta bomba por ser un recurso preexistente de la institución. Otros componentes clave incluyen una válvula de aire ubicada antes de la bomba, un filtro de anillos equipado con manómetros a su entrada y salida para fines de monitoreo y mantenimiento, un tanque de 500 L, un manómetro adicional ubicado después del filtro, válvulas de bola y tuberías de PVC de una pulgada que conducen el flujo de agua a través del cabezal. Si bien se observa la existencia de tres líneas de salida de agua (preexistentes a la propuesta del sistema), para la configuración implementada fue suficiente utilizar solamente una de ellas.

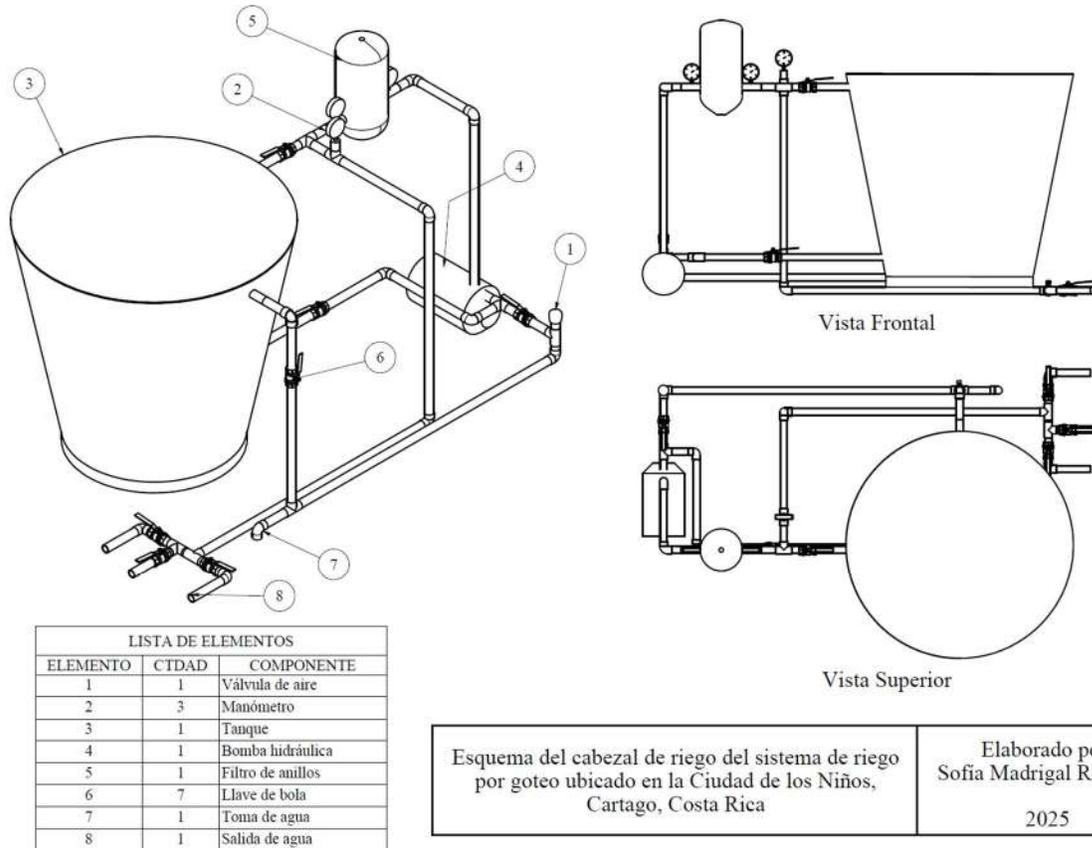
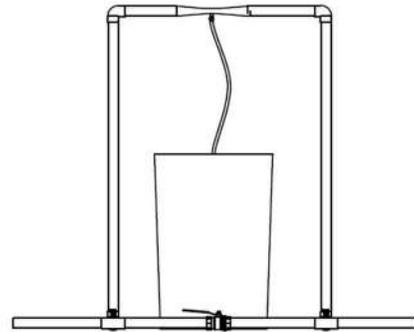
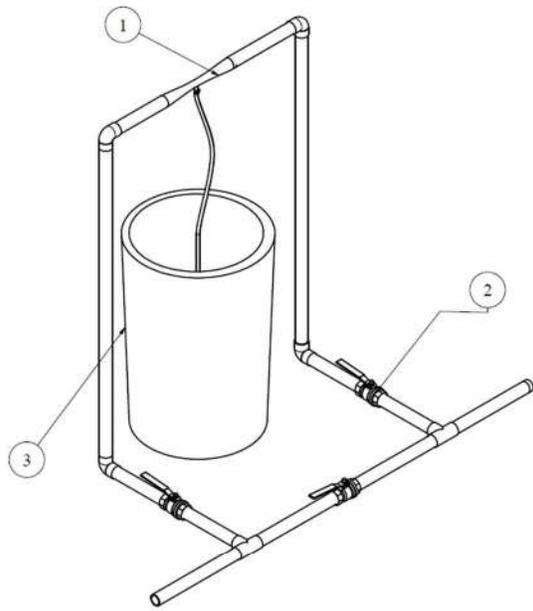
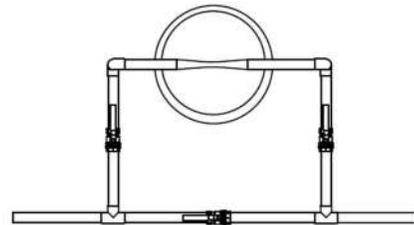


Figura 15. Esquema del cabezal de riego del sistema de riego por goteo ubicado en la Ciudad de los Niños, Cartago, Costa Rica. Elaboración propia en Inventor.

El sistema de inyección de fertilizantes (venturi) instalado en la red de riego de los lotes de cultivo se presenta en la figura 16. Este está compuesto por una estructura con tuberías de PVC de una pulgada y un inyector venturi en línea. Además, dispone de tres válvulas de bola para el control del flujo de agua, las cuales se ajustan para dirigir el caudal a través de dicho inyector cuando se requiere aplicar el fertirriego.



Vista frontal



Vista superior

LISTA DE COMPONENTES		
ELEMENTO	CTDAD	COMPONENTE
1	1	Venturi
2	3	Llave de bola
3	1	Balde

Esquema del sistema para aplicar el fertirriego (venturi) en los lotes de siembra ubicados en la Ciudad de los Niños, Cartago, Costa Rica.	Elaborado por: Sofia Madrigal Ramirez. 2025
--	---

Figura 16. Esquema del sistema para aplicar el fertirriego (Venturi) en los lotes de siembra ubicados en la Ciudad de los Niños, Cartago, Costa Rica. Elaboración propia en Inventor, versión 2025.

Los materiales empleados en la instalación del sistema de riego por goteo en la Ciudad de los Niños se detallan en el cuadro 7. Se especifica en ella la ubicación de cada uno de los materiales en el sistema de riego diseñado.

Cuadro 7. Lista de materiales empleados para la instalación del sistema de fertirriego en la Ciudad de los Niños, Cartago.

Material/Equipo	Cantidad	Unidad	Ubicación
Tubos de PCV SDR 26 de 1"	54	m	General, línea de tubería principal.
Tubos de PE de 2 "	45	m	General, línea de tubería secundaria.
Cinta de goteo no autocompensante de 1.1 l/h	1258	m	Lotes de siembra a campo abierto.
Cinta de goteo no autocompensante de 2.2 l/h	361	m	Lotes de siembra en ambiente protegido.
Venturi de 1 "	1	u	Ambiente protegido en la línea de la tubería principal.
Válvulas de bola de 2 "	4	u	Al inicio de cada tubería secundaria.
Válvulas de bola lisa de 1 "	5	u	Cabezal de riego y sistema de inyección.
Tee de 1 "	15	u	General.
Tapón de PVC de 2 "	8	u	Al final de cada tubería secundaria.
Reductores de 1 " a 2 "	8	u	Conexiones entre la tubería principal y secundaria.
Reductor de 1 " a 1 1/4 "	1	u	Conexión entre la tubería principal de 1 1/4 " a la de 1 ".
Filtro de anillos de 1 "	1	u	Cabezal de riego.
Válvula ventosa de 1 "	1	u	Cabezal de riego.
Tapones para cinta de goteo	85	u	Al final de las cintas de goteo.
Conector cinta de goteo	85	u	Conexiones entre las cintas de goteo y la tubería secundaria.
Uniones lisas de 1 "	10	u	General.
Uniones hembra de 1 "	2	u	Sistema de inyección.
Uniones de tope de 1 "	5	u	General.
Codos lisos en 90° de 1 "	15	u	General.

Material/Equipo	Cantidad	Unidad	Ubicación
Manómetro (0-10 bar)	1	u	Cabezal de riego.
Pegamento PCV	1	u	General.

4.3 Evaluación del desempeño del sistema de riego diseñado e implementado

Se llevó a cabo una evaluación del sistema de riego por goteo en todos los lotes de siembra, excepto en el área destinada a hidroponía, ya que durante el periodo de medición no se disponía de las estructuras previstas para el desarrollo de los cultivos hidropónicos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos respecto a la uniformidad y distribución del riego, la presión del sistema en las cintas de goteo y la distribución de los fertilizantes en el sistema.

4.3.1 Coeficiente de Uniformidad de Christensen (CU) y Coeficiente de Distribución (DU)

Luego de aplicar las ecuaciones correspondientes para determinar el CU y el DU, se obtuvieron los resultados que se muestran en el cuadro 8 para cada uno de los sectores de siembra. Se destaca que el mayor porcentaje de ambos coeficientes fue para el sector a campo abierto destinado al cultivo de cebolla con 95.1% de CU y 92.7% de DU.

Cuadro 8. Valores del CU y DU para la evaluación del sistema de riego por goteo correspondientes a cada lote de siembra en la Ciudad de los Niños, Cartago.

Cultivo	CU (%)	DU (%)
Tomate (Ambiente protegido)	93.7	91.0
Cebolla (Campo abierto)	95.1	92.7
Lechuga (Campo abierto)	94.9	92.3

4.3.2 Coeficiente de Uniformidad de Presiones (CU_p)

El CU_p para cada área de cultivo trabajada se determinó y sus resultados se muestran en el cuadro 9. En este caso el sector con cultivo de lechuga a campo abierto fue el que presentó el mayor valor de este coeficiente, con 93,2%.

Cuadro 9. Valores del CU_p para la evaluación del sistema de riego por goteo correspondientes a cada lote de siembra en la Ciudad de los Niños, Cartago.

Cultivo	CU _p (%)
Tomate (Ambiente protegido)	90.3
Cebolla (Campo abierto)	91.2
Lechuga (Campo abierto)	93.2

4.3.3 Conductividad eléctrica (CE)

Se verificó el funcionamiento del venturi para asegurar que los fertilizantes se distribuyeran de manera uniforme a lo largo del sistema de riego. Se obtuvo un promedio de conductividad eléctrica de 0.50 ± 0.01 mS/cm en el agua de riego sin fertilizantes, mientras que el agua con sales disueltas, recolectada de los goteros, presentó una conductividad de 3.55 ± 0.32 mS/cm.

5. Discusión

5.1 Caracterización del sitio y determinación del requerimiento hídrico de los cultivos

El crecimiento y desarrollo óptimo de un cultivo dependen de mantener la disponibilidad de agua en la zona radicular dentro de un rango adecuado, evitando así el estrés por exceso o deficiencia hídrica. La CC y el PMP definen el rango de agua disponible para la planta, conceptualizando el suelo como un reservorio vital. La tasa de infiltración del suelo determina la velocidad de recarga de este reservorio, mientras que la descarga se produce por la evapotranspiración (ET) del cultivo, cuya demanda de agua varía según el clima y la etapa fenológica de la planta (Zotarelli et al., 2019). Esta dinámica interacción entre la demanda de la planta (ET), la provisión de agua por el suelo desde su reservorio y la recarga por el riego (limitada por la infiltración) es fundamental para una gestión hídrica eficaz.

La demanda de agua de los cultivos (ET) varía entre ambientes protegidos y condiciones de campo abierto, incluso para el mismo tipo de cultivo. Esta diferencia se debe a que la cubierta del ambiente protegido modifica el microclima local, reduciendo la velocidad del viento y aumentando la humedad relativa, lo cual disminuye la tasa de evapotranspiración en comparación con el exterior (Martins Guimarães et al., 2022). Por ende, comprender cómo el ambiente específico altera la ET y la dinámica del agua en el suelo es crucial para diseñar y operar un sistema de riego y fertirriego que asegure una aplicación precisa de agua y nutrientes, optimizando así el aprovechamiento de los recursos por parte del cultivo para su desarrollo.

5.1.1 Evapotranspiración

Los valores de la evapotranspiración de referencia (ET_0) calculados mediante el software ET_0 Calculator de la FAO presentaron diferencias notables entre el ambiente protegido (promedio 2.6 mm/día) y el campo abierto (promedio 3.5 mm/día). Esta disparidad resulta previsible, puesto que la estructura del invernadero induce modificaciones sustanciales en las condiciones microclimáticas internas en comparación con el entorno exterior. Un factor determinante en esta variación es la reducción de la velocidad del viento a niveles prácticamente nulos dentro del ambiente protegido, lo cual disminuye considerablemente la ET_0 (Allen et al., 1998). Si bien la radiación solar incidente puede experimentar una ligera atenuación debido al material de la cubierta del ambiente protegido, el efecto combinado de una temperatura superior y una humedad relativa mayor, sumado a la mencionada carencia de viento, conduce a una menor demanda

evapotranspirativa. Estos hallazgos concuerdan con observaciones reportadas en estudios previos realizados en condiciones similares (Martins Guimarães et al., 2022; Soto Bravo y Rodríguez Ocampo, 2021).

La ET_0 máxima en ambos sistemas se registró en marzo, coincidiendo con uno de los periodos de menor precipitación y mayor radiación solar en la zona de Cartago, característico de la época seca (Villalobos Flores et al., 2017). Por el contrario, los valores mínimos de ET_0 , observados en noviembre y diciembre, se corresponden con la fase de transición hacia la época lluviosa, o bien con el inicio de esta, la cual se caracteriza por una mayor nubosidad y, consecuentemente, una menor radiación solar disponible. Es relevante destacar que la metodología de Penman-Monteith, implementada en el software ET_0 Calculator para la estimación de la ET_0 , es el procedimiento estándar recomendado a nivel global debido a su sólida base física y su demostrada precisión en una amplia gama de condiciones climáticas (Mahmoodi-Eshkaftaki y Rafiee, 2021).

Una limitación en la determinación de la ET_0 en campo abierto fue la necesidad de utilizar datos de insolación de una estación meteorológica diferente (Potrero Cerrado), aunque se encontraba en relativa proximidad geográfica. Si bien se promediaron los datos disponibles, la diferencia de altitud y condiciones locales podría introducir alguna desviación en el cálculo preciso de la radiación neta y, por ende, de la ET_0 (Bois et al., 2008). Para el ambiente protegido, la imputación de datos para completar el año y el análisis de valores atípicos en los datos de los sensores HOBO fueron pasos necesarios para obtener una serie temporal robusta, aunque la imputación siempre introduce un grado de incertidumbre (Del Callejo Canal et al., 2022). La calibración previa de los sensores HOBO buscó minimizar errores sistemáticos en las mediciones de temperatura y humedad.

La evapotranspiración de referencia (ET_0) representa el potencial máximo de pérdida de agua en unas condiciones de clima específicas que se origina por un suelo sin limitaciones hídricas y por un cultivo de referencia (pasto), y requiere del ajuste de este valor al cultivo con el que se esté trabajando. Para determinar la demanda real de agua de un cultivo específico bajo condiciones óptimas, conocida como evapotranspiración del cultivo (ET_c), es necesario ajustar la ET_0 mediante el coeficiente del cultivo (K_c). En algunos casos, la ET_c puede ser menor a la ET_0 , específicamente ocurre cuando el K_c es menor a 1, lo que indica que el cultivo en cuestión está perdiendo menos agua por evapotranspiración en comparación a la superficie de referencia estandarizada. Normalmente esto está relacionado con las etapas fenológicas ya que el K_c varía en cada una de ellas. Por ejemplo, al inicio las plantas poseen menor masa foliar lo que reduce su transpiración en comparación a la cubierta de pasto (Allen et al., 1998).

La adopción de los coeficientes de cultivo (K_c) de la FAO-56 (Allen et al., 1998) para la etapa media de desarrollo fenológico representa una aproximación estándar y ampliamente aceptada en escenarios donde no se dispone de valores de K_c calibrados bajo condiciones locales específicas.

Estos valores tabulados integran el efecto de las características del cultivo tales como la altura, cobertura y resistencia estomática, sobre la evapotranspiración bajo condiciones óptimas. La selección del K_c de la etapa media (K_c med), que generalmente representa el pico de demanda hídrica, asegura que el diseño del sistema de riego tenga la capacidad de satisfacer las necesidades máximas del cultivo (Allen et al., 1998). Sin embargo, es importante reconocer que los K_c pueden variar según la variedad específica, las condiciones climáticas locales y las prácticas de manejo (Allen et al., 1998). En este sentido, la realización de ajustes o la calibración de los valores de K_c basados en observaciones y mediciones de campo locales resultaría beneficiosa para optimizar la gestión operativa del riego y lograr una mayor precisión en la programación hídrica.

5.1.2 Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)

Los valores de CC (43%) y PMP (35%) determinados en el laboratorio del CIA se consideran porcentajes altos según Lince-Salazar (2021), además de mencionar que valores mayores a 36% y 22% respectivamente son característicos de suelos arcillosos. Sin embargo, la capacidad de retención de agua aprovechable (lámina de agua disponible) resultantes de la diferencia entre la CC y PMP, es relativamente baja, cuantificada en un 8% (Lince-Salazar, 2021). Un bajo contenido de agua disponible implica una menor capacidad de almacenamiento hídrico entre eventos de riego, lo que consecuentemente demanda la aplicación de riegos más frecuentes para mitigar el estrés hídrico en el cultivo (Zotarelli et al., 2019). Los valores de CC y PMP son típicos y coherentes para suelos andosólicos de Cartago según Alvarado et al. 2014, sin embargo, como se mencionó, la retención de agua es limitada, por lo que el riego mediante sistemas presurizados por goteo y sistema de dosificación de los nutrientes es el mecanismo ideal en esta condición.

No obstante, es fundamental reconocer que la principal limitación metodológica de este análisis radicó en la restricción presupuestaria que imposibilitó realizar determinaciones edáficas separadas para el suelo del ambiente protegido. Aunque ambos sitios presentan proximidad espacial, las prácticas de manejo agronómico difieren significativamente entre ellos. Específicamente, la menor intensidad de laboreo, la potencial acumulación diferencial de materia orgánica y la ausencia del impacto directo de la precipitación pluvial en el ambiente protegido son factores que pueden inducir alteraciones considerables en la estructura del suelo a lo largo del tiempo (Baker et al., 2007; Piccoli et al., 2017). Asumir valores idénticos es una simplificación necesaria en este contexto, pero debe ser considerada al interpretar los resultados de programación de riego.

Por otra parte, diversos estudios han establecido una relación inversa entre la densidad aparente (DA) del suelo y la CC y PMP (Salamanca Jiménez y Sadeghian Khalajabadi, 2005; Lince-Salazar, 2021). Esta relación se explica porque valores bajos de DA generalmente se asocian con menor compactación (reflejada en menor resistencia a la penetración) y, con frecuencia, con mayores contenidos de materia orgánica. Estas condiciones, a su vez, favorecen una mayor capacidad del suelo para retener humedad (Salamanca Jiménez y Sadeghian Khalajabadi, 2005).

5.1.3 Densidad aparente (DA)

Los valores de DA obtenidos mediante el método del cilindro en el campo abierto mostraron una ligera tendencia a disminuir con la profundidad. En contraste, en el ambiente protegido se observó un aumento de la DA hasta los primeros 20 cm, seguido por una tendencia decreciente en los estratos más profundos. Esta diferencia en el comportamiento de la DA entre ambientes podría estar relacionada con múltiples factores edáficos. Uno de los más relevantes es el contenido de carbono orgánico del suelo, el cual tiende a ser mayor en los horizontes superficiales y está inversamente relacionado con la DA, debido a la menor densidad del material orgánico respecto a los minerales del suelo (Baker et al., 2007; Piccoli et al., 2017). Otros factores que considerar incluyen el grado de perturbación del suelo, el historial de manejo, la actividad biológica (como la presencia de raíces y macrofauna), y las condiciones de humedad, que pueden influir en la redistribución de partículas y en la estructura edáfica (Phalempin et al., 2021; Lin et al., 2025).

Los valores promedio en las profundidades muestreadas (10, 20 y 40 cm) se situaron en torno a 1.13 g/cm³ en el ambiente protegido y 1.16 g/cm³ en campo abierto. Estos valores se consideran bajos a medios y son característicos de suelos con textura fina ($DA \leq 1.25 \text{ g/cm}^3$) (Antúnez B et al., 2015). Valores de DA en este rango suelen indicar una buena porosidad y aireación del suelo, condiciones generalmente favorables para el desarrollo radicular y la actividad microbiana (Phalempin et al., 2021).

Los valores encontrados aquí no sugieren problemas de compactación severa en las profundidades muestreadas (hasta 40 cm). Las ligeras diferencias observadas entre el ambiente protegido (ligeramente mayor DA) y el campo abierto podrían deberse a variaciones en el contenido de materia orgánica o al historial de manejo (tráfico, laboreo), aunque son relativamente pequeñas. La determinación precisa de la DA es fundamental no solo como indicador de la condición física del suelo, sino también porque es necesaria para convertir el contenido de humedad gravimétrico (expresado en porcentaje de peso, como los datos de CC y PMP) a contenido de humedad volumétrico (expresado en porcentaje de volumen). Este último es el que se utiliza directamente para calcular la lámina de agua almacenada en una determinada profundidad de suelo, por lo que la precisión en el cálculo de la lámina neta (L_n) depende directamente de la exactitud del valor de DA utilizado.

5.1.4 Infiltración del suelo

La tasa de infiltración del suelo representa la capacidad de este para absorber el agua proveniente de la precipitación o del riego. Esta propiedad depende de diversos factores, entre los que destacan la textura y la estructura del suelo (Úbeda Rivera y Delgado Dallatorre, 2018). Es importante señalar que las labores de preparación de un terreno agrícola, como el arado, modifican significativamente su estructura física, lo cual puede influir en el comportamiento hidrológico del mismo (Baker et al., 2007).

Las mediciones de infiltración en los lotes de siembra de la Ciudad de los Niños se realizaron posterior al proceso de arado. Este laboreo influyó en los valores elevados de la tasa de infiltración

observados tanto en campo abierto como en ambiente protegido (Savva y Frenken, 2002; Rosales-Naranjo et al., 2020). Esta condición es relevante para la interpretación de los resultados, pues sugiere que los valores registrados reflejan una condición temporal del suelo favorecida por la labranza reciente, y no su estado estructural cotidiano. Esto se refuerza al considerar que los resultados de DA, CC y PMP son indicadores de un suelo con textura fina (ver secciones 5.1.2 y 5.1.3), la cual típicamente presenta tasas de infiltración menores a las observadas (Gómez et al., 2014; Úbeda Rivera y Delgado Dallatorre, 2018).

Desde el punto de vista del diseño y manejo del sistema de riego, una elevada tasa de infiltración, junto con una baja capacidad de retención hídrica del suelo, refuerzan la necesidad de aplicar riegos con alta frecuencia y de corta duración (Úbeda Rivera y Delgado Dallatorre, 2018). Sin embargo, la decisión de aplicar esta estrategia en el diseño de riego propuesto se basó principalmente en la capacidad de retención que se obtuvo del suelo en estudio. Esta tiene como propósito minimizar la escorrentía superficial y reducir las pérdidas de agua y nutrientes por lixiviación, aspectos críticos en un sistema de fertirriego (Javadi y Ostad-Ali-Askari, 2023).

Como consecuencia de la alta tasa de infiltración obtenida, el diseño de la prueba en campo se ajustó a intervalos de medición no mayores a 10 minutos, dado que, incluso antes de transcurrido ese tiempo, el agua aplicada en ambos anillos de infiltración se absorbía por completo. Este comportamiento se mantuvo incluso después de dos horas del inicio del ensayo.

Los resultados de DA muestran un comportamiento contrastante entre el campo abierto y el ambiente protegido. En el campo abierto, se observaron valores constantes y altos en la capa superficial (1.22 g/cm³ a 10 y 20 cm), pero significativamente menores a 40 cm (1.05 g/cm³), lo que favorece una mayor infiltración vertical del agua y, por ende, una tasa de infiltración más elevada (1.10 mm/min). Esto permitirá estrategias de riego por goteo con mayores volúmenes y menor frecuencia, además de facilitar una distribución más profunda de los nutrientes aplicados vía fertirriego.

En el ambiente protegido, aunque la densidad aparente es menor en la superficie (1.06 g/cm³), se incrementa a 20 cm (1.21 g/cm³), lo que sugiere una posible capa compactada que limita la percolación vertical. Este patrón se refleja en la tasa de infiltración ligeramente menor (1.00 mm/min), lo cual obliga a un manejo más cuidadoso del fertirriego. En este caso, se recomienda aplicar pequeñas dosis con mayor frecuencia para evitar acumulación superficial y asegurar la disponibilidad de nutrientes en la zona radicular activa.

5.1.4 Fuente de agua destinada al riego

El caudal aforado de la fuente de agua de 4.17 ± 0.19 m³/h es un parámetro de diseño crítico. Al compararlo con los caudales totales requeridos calculados para los diferentes sectores de cultivo (según se detalla en el cuadro 5) se confirma que el caudal disponible es suficiente para operar cada sector individualmente. Sin embargo, es insuficiente para operar simultáneamente aquellos

sectores que presentan la mayor demanda hídrica combinada, por ejemplo, el sector de tomate en conjunción con otro de demanda considerable. Esto conllevó a una justificación técnica sólida para la implementación de un diseño sectorizado con válvulas independientes para gestionar el riego de manera secuencial.

Aunque no se realizó un análisis químico completo del agua del pozo como parte de este trabajo, es importante destacar que la calidad del agua es un factor de suma relevancia, particularmente cuando se contempla la aplicación de fertirriego a largo plazo. Aspectos como la concentración de sales disueltas, el pH, la presencia de sólidos suspendidos y la concentración de ciertos iones específicos pueden tener implicaciones directas y significativas en la posible obstrucción de los emisores de riego, afectando la uniformidad de la aplicación de agua y fertilizantes (Sánchez y Viáfara, 2012; Dehghanisanij et al., 2025). El monitoreo periódico de la calidad del agua es recomendable para prevenir problemas operativos y nutricionales.

5.2 Determinación del sistema de riego y su implementación

5.2.1 Diseño agronómico

Los parámetros de riego definidos (ver cuadro 5) establecen una estrategia de alta frecuencia diaria, con tiempos de aplicación breves (15–32 minutos), fraccionados en tres pulsos de 5 a 11 minutos. Esta decisión responde a las características del sitio: suelos con baja capacidad de retención de humedad (8% de agua disponible), alta infiltración (>1 mm/min) y el uso de riego por goteo, que limita el volumen de suelo mojado al bulbo húmedo. Estos factores justifican riegos frecuentes y fraccionados para evitar percolación profunda, mantener la humedad en la zona radicular y garantizar eficiencia en la distribución del agua y los nutrientes.

La configuración espacial de los cultivos también respondió a sus requerimientos agronómicos. En tomate se emplearon lomillos para permitir mayor espaciamiento y favorecer el drenaje, previniendo enfermedades radiculares asociadas al exceso de humedad. En lechuga y cebolla se optó por camas elevadas de un metro de ancho, adecuadas por sus menores exigencias de espaciamiento y su sistema radicular más superficial. En todos los casos se utilizó un espaciamiento estandarizado entre goteros de 30 cm, decisión tomada por criterios económicos para evitar la compra de diferentes rollos de cinta. Este valor representa un punto medio entre las recomendaciones para tomate (≈ 40 cm) y para lechuga y cebolla (≈ 20 cm).

El porcentaje de agotamiento hídrico, es decir, la cantidad de agua en el suelo que se consume antes de aplicar el riego nuevamente se estableció según las necesidades de cada cultivo, las características del suelo, así como información bibliográfica (Gómez-Masjuan, Tornés-Oliviera, et al., 2024; Soto-Bravo y Betancourt-Flores, 2024). Se estableció utilizar una profundidad de raíces basada en la literatura, así como lo observado en campo, de tal forma que para el tomate se utilizó una profundidad de 40 cm (Seed Co Group, 2021a), mientras que para la lechuga (en suelo e hidropónica) y cebolla correspondió 20 cm (Fornaria Rullán, 2012; Seed Co Group, 2021b).

Aunque el diseño agronómico inicial del sistema de riego se basó en cinta de goteo de 1.1 l/h, dada su idoneidad para suelos de alta infiltración y baja retención, así como su menor costo inicial (Vishwakarma et al., 2023), la institución contaba con un rollo de 500 m de cinta de goteo de 2.2 l/h cuyo uso era prioritario. Por ello, se determinó emplear este caudal en el ambiente protegido para los cultivos de tomate y lechuga hidropónica, decisión justificada por la menor superficie de siembra de este sector (307 m²) en comparación con el campo abierto (670 m²), permitiendo así reservar la mayor disponibilidad de cinta de 1.1 l/h (2500 m) para las parcelas exteriores. La diferencia en el caudal de los emisores se gestionó mediante la calibración de los tiempos de riego para estos cultivos, asegurando la aplicación de la lámina hídrica requerida.

El enfoque de riego diario busca reponer la evapotranspiración del cultivo (ET_c), mantener niveles constantes de humedad en la zona radicular activa y prevenir el estrés hídrico, especialmente en cultivos sensibles como tomate, lechuga y cebolla. Las láminas brutas (L_b) calculadas (2.83 a 3.89 mm), incorporan una eficiencia de aplicación del sistema (E_f) asumida del 95% (Irrigation Australia Limited, 2017). Este valor teórico considerado para sistemas de riego por goteo, si bien alto, es alcanzable en sistemas bien diseñados y mantenidos. No obstante, la eficiencia real en campo dependerá de la uniformidad de distribución lograda (evaluada en Sección 5.3) y de un manejo operativo que prevenga pérdidas por deriva por viento, escorrentía superficial o percolación excesiva (Valverde Conejo, 2022).

Las variaciones en los tiempos de riego calculados por cultivo/sector obedecen a la combinación de su lámina bruta, la profundidad radicular efectiva (Pr), el nivel de agotamiento permitido (Ag) y la precipitación de los emisores (mm/h), determinada por el caudal del gotero y su espaciamento. La división del tiempo total de riego en pulsos (tres por día) persigue mejorar la distribución espacial del agua dentro del bulbo húmedo (tanto horizontal como vertical), particularmente en suelos de alta infiltración, y favorecer la aireación radicular al prevenir la saturación prolongada del suelo (Ramadan. et al., 2024).

5.2.2 Diseño hidráulico

Posterior a la elaboración del diseño agronómico del sistema de riego y realizar los cálculos hidráulicos, se determinó que el diámetro de las tuberías principales y secundarias debe respetar una velocidad del flujo de agua entre 1.5 y 2 m/s, valor recomendado para este tipo de sistemas (Irrigation Australia Limited, 2017). Adicionalmente, la elección del material de las tuberías se diferenció por tramo: la línea principal se especificó en policloruro de vinilo (PVC) con un SDR de 26, mientras que para las tuberías secundarias (divisores) se optó por polietileno de alta densidad (HDPE). Esta decisión se basó en las propiedades de cada material y su funcionalidad específica dentro de la red: la rigidez y alta resistencia a la presión del PVC lo hacen idóneo para la línea principal que soporta mayores caudales y presiones, garantizando su durabilidad y longevidad; mientras que la flexibilidad y la facilidad de conexión del PE con las cintas de goteo resultan

ventajosas para las líneas secundarias, optimizando la instalación y manipulación en campo (Arthur et al., 2020).

Respecto al diseño de los divisores, inicialmente se determinó que el diámetro óptimo era de una pulgada, según los cálculos hidráulicos realizados, los cuales garantizaban un suministro adecuado de presión y caudal hacia las cintas de goteo. No obstante, por sugerencia técnica y con el objetivo de anticiparse a eventuales ampliaciones del sistema o facilitar futuras labores de mantenimiento, se optó finalmente por utilizar tuberías de 2 pulgadas.

Los cálculos hidráulicos aseguran que las cintas de goteo reciban la presión adecuada de operación, lo cual es fundamental para la uniformidad del riego. En cuanto a los emisores, se seleccionaron cintas de goteo no autocompensantes, dado que las áreas de siembra no presentan pendiente. Se garantizó, además, que la variación de presión entre los diferentes tramos del sistema no exceda el 20%, tal como lo establece la literatura (Irrigation Australia Limited, 2017). Para esta evaluación se utilizó la fórmula de Hazen-Williams, empleando un coeficiente de Hazen-Williams de 140 tanto para PE como para PVC (Alegret Breña y Martínez Valdés, 2019).

Con el fin de garantizar un funcionamiento hidráulico óptimo del sistema, se estableció, mediante los cálculos realizados, que una bomba capaz de operar con un caudal mínimo de 3 m³/h y una carga dinámica total de 40 m sería suficiente para cubrir las demandas de riego. En consideración del caudal de trabajo, la carga dinámica total, el NPSH disponible y la eficiencia, se propone para el sistema de riego una electrobomba centrífuga con doble rodete Pedrollo modelo 2CP25/14B. Este modelo particular ha sido seleccionado debido a que satisface los parámetros de operación calculados y presenta una eficiencia que se alinea con los criterios de diseño establecidos, según se observa en la curva característica de esta bomba en la figura 17 del anexo.

No obstante, la institución ya contaba con una bomba centrífuga marca Pearl de 1,0 hp previamente instalada. Dado que esta presenta una potencia disponible mayor que la requerida por el sistema (estimada en aproximadamente 0,62 hp), se incorporó un mecanismo de regulación mediante una línea de retorno hacia el tanque de almacenamiento. Este arreglo permite mantener estable la presión de operación, al redirigir el caudal excedente y evitar sobrepresiones en el sistema de riego. Cabe señalar que el cabezal de riego, incluyendo el sistema de retorno, ya se encontraba montado antes de la implementación del diseño propuesto, por lo que no fue una decisión adoptada en esta etapa del proyecto. En este contexto, se sugiere como alternativa más eficiente la instalación de una válvula reguladora de presión posterior a la bomba, lo cual permitiría un control más preciso del sistema sin necesidad de recircular el agua, optimizando así el desempeño hidráulico.

Se muestra en cuadro 10, una comparativa de los componentes del sistema de riego anterior, el sistema actual y el ideal:

Cuadro 10. Comparación entre el sistema de riego anterior, el actual y el ideal para la Ciudad de los Niños, Cartago.

Componente	Sistema de riego		
	Anterior	Actual	Ideal
Bomba hidráulica	Pearl modelo JSP 10F16S, potencia de 1 hp y un caudal de trabajo de 10 a 60 L/min	Pearl modelo JSP 10F16S, potencia de 1 hp y un caudal de trabajo de 10 a 60 L/min.	Pedrollo modelo 2CP25/14B, caudal de trabajo de 3 m ³ /h con altura manométrica de 40 m.
Válvula ventosa	No	Sí, antes de la bomba hidráulica.	Sí, antes de la bomba hidráulica.
Filtro	No	Sí, filtro de anillos posterior a la bomba hidráulica.	Sí, filtro de anillos posterior a la bomba hidráulica.
Tanque de 500 L	Sí, para regar sectorizado todas las áreas de cultivo.	Sí, para el fertirriego proporcional del área hidropónica dentro del ambiente protegido.	Sí, para el fertirriego proporcional del área hidropónica dentro del ambiente protegido
Manómetros	No	Sí, luego del filtro de anillos.	Sí, uno en el cabezal de riego, luego del filtro de anillos, y otros colocados al inicio de cada sector de riego, antes de las cintas de goteo. También, si se instala una válvula reductora de presión, se debe colocar uno después de esta.
Válvula reductora de presión	No	No, se recomendó la instalación	Sí, válvula de 1” ubicada en la tubería principal después del Venturi y antes de la tubería secundaria.

Componente	Sistema de riego		
	Anterior	Actual	Ideal
Tuberías de conducción	Parcialmente, en el cabezal de riego y tres tuberías principales de PE (1 ¼") que abarcaban desde el cabezal de riego hasta un extremo del ambiente protegido.	Sí, luego del cabezal de riego y la tubería principal (1 ¼"), tubería principal (1") y tuberías secundarias (2") para cada sector de riego.	Sí, tubería principal (1") y tuberías secundarias (2") para cada sector de riego.
Cintas de goteo	No	Sí, cintas de goteo no autocompensantes de 1.1 l/h para campo abierto y 2.2 l/h para ambiente protegido.	Sí, cintas de goteo no autocompensantes de 1.1 l/h para todo el sistema de riego.
Sistema de inyección de fertilizantes	No	Sí, un Venturi de 1" dentro del ambiente protegido para el fertirriego no proporcional del tomate en ambiente protegido y para los dos sectores de siembra a campo abierto.	Sí, Venturi de 1" dentro del ambiente protegido para el fertirriego no proporcional del tomate en ambiente protegido y para los dos sectores de siembra a campo abierto.
Válvulas de paso	Sí, en el cabezal de riego.	Sí, en el cabezal de riego y en cada sector de riego.	Sí, en el cabezal de riego y en cada sector de riego.

En cuanto a la fuente de agua, si bien esta proviene originalmente de un pozo, ya existe una red de distribución establecida a través de tuberías que abastecen la zona. Por tanto, el agua utilizada para el riego no requiere extracción directa del pozo, ya que está disponible localmente dentro del sistema de distribución preexistente, facilitando el acceso y reduciendo la demanda sobre la fuente original.

5.2.3 Planos de diseño

La elaboración de los planos en AutoCAD 2025 permitió detallar la disposición espacial de todos los componentes del sistema (tuberías principales, secundarias, laterales de goteo, válvulas, filtros, sistema de inyección) tanto en el ambiente protegido como en el campo abierto. En este proceso,

se priorizó el diseño de una configuración espacial óptima, buscando activamente la disposición que permitiera el uso más eficiente de la tubería y demás materiales para minimizar su consumo. Estos planos son esenciales no solo para la correcta instalación por parte del personal encargado, sino también para futuras labores de mantenimiento, operación y posibles modificaciones o expansiones del sistema. La precisión en el dimensionamiento y ubicación de los componentes en los planos es clave para asegurar que el sistema construido se corresponda con el diseño hidráulico calculado.

1.1.1 Coeficiente de Uniformidad de Christiensen (CU) y Coeficiente de Distribución (DU)

Los resultados obtenidos para el CU y DU reflejan un buen desempeño técnico del sistema de riego implementado al superar los valores considerados como adecuados de 85% y 80% respectivamente (Irrigation Australia Limited, 2017). Se alcanzaron valores de 93.7%, 95.1% y 94.9% para el CU y 91.0%, 92.7% y 92.3% para el DU ambos coeficientes respectivamente en el tomate (ambiente protegido), cebolla y lechuga (campo abierto). Lo que indica que la aplicación del agua en los diferentes emisores fue altamente homogénea en las tres áreas de cultivo evaluadas.

No obstante, aunque los resultados son técnicamente adecuados, se debe considerar que la uniformidad hidráulica puede verse comprometida a lo largo del tiempo debido a la acumulación de sedimentos o sales en los goteros. Esto es particularmente importante en sistemas que utilizan fertilizantes, ya que la interacción de estos con el agua puede acelerar la obstrucción. Por tanto, es esencial que el sistema incluya protocolos de mantenimiento regulares, especialmente de limpieza de emisores y filtros, para conservar estos niveles de desempeño en el mediano y largo plazo (Petit et al., 2022)

5.3 Evaluación del desempeño del sistema de riego diseñado e implementado

5.3.2 Coeficiente de Uniformidad de Presiones (CU_p)

El CU_p complementa los indicadores anteriores al evaluar la estabilidad de la presión en el sistema, variable fundamental en el riego por goteo, dado que pequeñas variaciones pueden traducirse en diferencias significativas en el caudal emitido por los goteros (Allende C et al., 2024). Los valores obtenidos fueron 90.3% para el tomate, 91.2% para la cebolla y 93.2% para la lechuga, superando el umbral mínimo de 90% que define un sistema con desempeño hidráulico óptimo (Rodríguez Bejarano, 2018). Estos resultados reflejan que la pérdida de presión a lo largo de las líneas de conducción y distribución fue mínima y controlada, resultado esperable en un sistema que fue diseñado tomando en cuenta cálculos de pérdidas de carga mediante la ecuación de Hazen-Williams.

Dada la esperada correlación entre CU, DU y CU_p , se anticiparía una coincidencia espacial en los sectores que presenten los valores más altos de estos coeficientes. No obstante, los resultados obtenidos mostraron una divergencia, con el mayor porcentaje de CU_p registrado en el sector de

lechuga a campo abierto, mientras que los valores más altos de CU y DU se obtuvieron en el área de cebolla a campo abierto. Esta diferencia podría atribuirse a la metodología de medición empleada, ya que las evaluaciones de presión y caudal no se realizaron simultáneamente durante la misma activación del riego. Consecuentemente, las posibles pequeñas variaciones en la presión y/o el caudal del sistema entre diferentes eventos de riego pudieron haber afectado los resultados finales.

5.3.3 Conductividad eléctrica (CE)

La medición de la CE constituye un indicador indirecto de la correcta incorporación y transporte de la solución fertilizante a lo largo del sistema. El aumento de la CE desde 0.50 ± 0.01 mS/cm en el agua sin fertilizantes hasta 3.55 ± 0.32 mS/cm posterior a la inyección de fertilizantes confirma que el sistema de inyección Venturi logró distribuir adecuadamente los nutrientes (Maltas et al., 2022).

Además, la alta homogeneidad en la aplicación del agua tiene implicaciones directas en la eficiencia del fertirriego, ya que asegura que los nutrientes disueltos lleguen de manera equilibrada a todas las plantas, lo que es fundamental para un desarrollo fenológico uniforme y una optimización del rendimiento del cultivo (Valverde Conejo, 2022). Relacionar su resultado de CU con la uniformidad de la CE que se espera.

Si bien las mediciones de CE proporcionan una indicación de que los fertilizantes se están aplicando a través del sistema de riego, es crucial mantener un estricto fraccionamiento del tiempo total de riego. Se recomienda destinar aproximadamente un 20% del tiempo al llenado inicial y presurización del sistema, un 40% a la inyección y distribución efectiva del fertilizante, y el 40% restante al lavado de las tuberías y emisores. Esta etapa de lavado es esencial no solo para asegurar que la totalidad del fertilizante aplicado sea desplazada hacia la zona radicular del cultivo, evitando que queden residuos en las cintas de riego, sino también para prevenir la obturación de los emisores por precipitación de sales o acumulación de residuos de fertilizantes (da Silva et al., 2022). Dicha obturación podría reducir la vida útil del sistema y generar heterogeneidad en futuras aplicaciones, afectando negativamente la uniformidad del riego y, por ende, la nutrición del cultivo.

6. Conclusiones

La caracterización climática y edáfica del sitio fue fundamental para el desarrollo de un diseño agronómico e hidráulico adaptado del sistema de riego por goteo. Se concluye que la estrategia de riego debe ser diaria (tomate: 43.21 min, lechuga hidropónica: 11.58 min, cebolla: 31.83 min, lechuga: 30.38 min), y que el volumen total debe aplicarse en tres pulsos para optimizar la disponibilidad hídrica y minimizar pérdidas, dada la alta tasa de infiltración (≤ 1.00 mm/min) y baja capacidad de retención de humedad del suelo (8%).

La aplicación simultánea de riego es inviable en la totalidad del área de estudio, debido a que el caudal requerido para todas las láminas brutas requeridas para los cuatro sectores de cultivo (variando de 2.83 a 3.89 mm), no es suficiente para el caudal entregado por el sistema de bombeo. Se concluye que se requiere la implementación de un esquema sectorizado para la operación del sistema.

La distribución de las cintas de goteo se optimizó según el cultivo y el método de siembra. Específicamente, se utilizaron dos cintas por bancal para la lechuga hidropónica, una cinta de lomillo por medio en el cultivo de tomate, y dos cintas por cama para la cebolla y lechuga a campo abierto.

Los coeficientes de uniformidad obtenidos (CU: 93.7%-95.1%, DU: 91.0%-92.3%, CU_p : 90.3%-91.2%), superiores al 90% en todos los casos, reflejan un funcionamiento considerado como adecuado en sistemas de riego presurizado por goteo.

Las mediciones de conductividad eléctrica (CE) validaron la efectiva distribución de los nutrientes inyectados tanto en los emisores a la cabeza, así como los de la cola del sistema de riego.

7. Recomendaciones

Para optimizar el diseño agronómico del sistema de riego, se debe realizar análisis de suelo separados para el área a campo abierto y el ambiente protegido, determinando sus valores específicos de Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP), densidad aparente (DA) e infiltración.

Considerando que la operación del sitio recae en estudiantes con disponibilidad limitada para una supervisión constante de los cultivos, se recomienda la automatización del riego en cada uno de los cuatro sectores de cultivo mediante la instalación de electroválvulas. Esta medida aseguraría la correcta y oportuna aplicación del riego.

Como medida alternativa para gestionar la presión excedente suministrada por la bomba, se recomienda la instalación de una válvula reductora de presión de 1 pulgada en la tubería principal, inmediatamente aguas abajo del cabezal de control.

Para la instalación del sistema de riego en el sistema hidropónico, se deben colocar dos cintas de goteo por bancal.

Es importante mantener supervisión constante de un adulto durante el uso de los fertilizantes tanto en hidroponía como en el sistema de inyección Venturi.

Adicionalmente, se recomienda realizar evaluaciones periódicas del CU y DU bajo distintas condiciones de operación, especialmente si se modifican las frecuencias de riego o se introducen nuevos cultivos con diferentes demandas hídricas.

Los futuros planes de fertilización para el sistema de fertirriego, debidos a cambios del tipo de cultivo, deberán ser avalados por un ingeniero agrónomo.

8. Referencias

- Alegret Breña, E., y Martínez Valdés, Y. (2019). Coeficiente de Hazen-Williams en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 40(3), 41–51. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382019000300041
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje N° 56). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Allende C, M., Negrón H, R., & Contreras S, C. (2024). *Importancia del monitoreo de la presión de operación en un sistema de riego por cintas de goteo* (Informativo INIA URURI N° 121). Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/00c2a11c-8bf5-4db9-9284-7adc60480be1/content>
- Alvarado, A., Mata, R y Chinchilla, M. (2014). Clay minerals identified in soils of Costa Rica from 1931 to 2014: I. History, methods of analyses, and mayor clay types found in volcanic ash derived soils. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 75-106. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242014000100007
- Antúnez B., A., Vidal S., M., Felmer E., S., & González Y., M. (2015). *Riego por Pulsos en Maíz Grano* (Boletín INIA N° 312). Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/95e0f05d-68ad-4f51-af73-fcacb286cb3a/content>
- Arthur, E. K., Gikunoo, E., Agyemang, F. O., Azeko, S. T., Andrews, A., y Twenewaa. (2020). Material Selection for Water Pipes by the Multi-Objective Decision-Making Method: The Case of Alternative Materials for PVC Pipes. *Journal of Science and Technology*, 5(1), 29–42. https://www.researchgate.net/publication/341120909_Material_Selection_for_Water_Pipes_by_the_Multi-Objective_Decision-Making_Method_The_Case_of_Alternative_Materials_for_PVC_Pipes
- Asao, T. (Ed.). (2012). *Hydroponics – A Standard Methodology for Plant Biological Researches*. InTech. <https://www.intechopen.com/books/1781>
- Baker, J. M., Ochsner, T. E., Venterea, R. T., y Griffis, T. J. (2007). Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1–4), 1–5. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2006.05.014>
- Barker, G. (2018). Pumps. En *The Engineer's Guide to Plant Layout and Piping Design for the Oil and Gas Industries* (pp. 189–210). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814653-8.00007-2>

- Bansal, G., Mahajan, A., Verma, A., y Bandhu Singh, D. (2021). A review on materialistic approach to drip irrigation system. *Materials Today: Proceedings*, 46, 10712–10717. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.546Carm>
- Béjar-Pulido, S. J., Cantú-Silva, I., Yáñez-Díaz, M. I., y Luna-Robles, E. O. (2021). Evaluación y predicción de la infiltración en un Andosol bajo diferentes usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7), 1171–1183. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/2327/4510>
- Bertsh Hernández, F. (2009). *Absorción de nutrimentos por los cultivos* (1a ed.). Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Blanco Moreno, C. (2019). *Aspectos técnicos de cultivo, riego y nutrición en lechuga, tomate y melón para la zona central de Chile*. (Boletín INIA N° 406). Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/b31172b0-a6cc-4376-9f7b-be0bc93f07ee/content>
- Bois, B., Wald, L., Pieri, P., Van Leeuwen, C., Commagnac, L., Chery, P., Christen, M., Gaudillère, J.-P., y Saur, E. (2008). Estimating spatial and temporal variations in solar radiation within Bordeaux winegrowing region using remotely sensed data. *OENO One*, 42(1), 15-25. <https://doi.org/10.20870/oenone-2008.42.1.829>
- Carmenates Hernández, D., López Silva, M., Mujica Cervantes, A., y Paneque Rondón, P. (2020). Histéresis hidráulica en emisores autocompensantes. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(3), 21-27. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542020000300021&lng=es&tlng=es.
- Carpio Carpio, C. (2017). *Diseño del sistema de riego por goteo en 332 hectáreas bajo el cultivo de caña de azúcar para el Ingenio Pantaleón, en Escuintla, Guatemala* [Trabajo de graduación de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9368/diseño_sistema_riego_hectareas_bajo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Çengel, Y. A., y Cimbala, J. M. (2018). *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. En *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill Interamericana.
- Ciudad de los Niños. (s.f.). *Nosotros*. Recuperado el 16 de octubre, 2023, de https://www.ciudaddelosninoscr.org/apps/pages/index.jsp?uREC_ID=1098832ytype=dypREC_ID=1382775
- Cun, R., Puig, O., Duarte, C., Montero, L., & Morales, C. (2012). Evaluación de la uniformidad del riego en miniaspersores y difusores en casa de producción de plántulas. *Revista Ingeniería Agrícola*, 2(1), 12–16. <https://www.redalyc.org/pdf/5862/586262034001.pdf>
- Dehghanisani, H., Mirlatifi, S. M., Emami, S., y Rajabzadeh, T. (2025). Reducing the clogging of emitters in drip irrigation systems using acid washing and ultrasonic technology. *Scientific Reports*, 15(1), 12499. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95915-w>

- da Silva, G. H., da Cunha, F. F., y de Brito, L. F. A. (2022). Advance Time to Determine Injection and Flushing Times in Drip Fertigation. *Horticulturae*, 8(12), 1103. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121103>
- Del Callejo Canal, D., Canal-Martínez, M. E., Vernazza, E., Urruticoechea, A., y Álvarez-Vaz, R. (2022). Consideraciones a la imputación múltiple. Un caso de estudio con datos panel. *Cuadernos del CIMBAGE*, 1(24), 33–47. [https://doi.org/10.56503/CIMBAGE/Vol.1/Nro.24\(2022\)p.33-47](https://doi.org/10.56503/CIMBAGE/Vol.1/Nro.24(2022)p.33-47)
- El Mashad, H. M., Zhang, R., y Pan, Z. (2019). Onion and Garlic. En *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products* (pp. 273–296). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00011-3>
- Fornaria Rullán, G. J. (2012). Características de la planta. En *Conjunto Tecnológico para la Producción de Cebolla* (Publicación 156). Universidad de Puerto Rico, Estación Experimental Agrícola. <https://www.uprm.edu/eea/wp-content/uploads/sites/177/2016/04/2.-CEBOLLA-CARACTERISTICAS-DE-LA-PLANTA-G.-Fornaris-v2012.pdf>
- Gamboa Conejo, A. A. (2013). *Diseño de un sistema de riego por goteo autocompensado para los semilleros de caña de azúcar, Finca Santa Marta, Coopeagri R.L. Pérez Zeledón, San José*. [Trabajo de graduación de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5808/sistema_goteo_caña_azucar_santamarta.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5808/sistema_goteo_ca%C3%B1a_az%C3%BAcar_santamarta.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Gómez-Masjuan, Y., Tornés-Oliviera, N., Brown-Manrique, O., y Guerrero-Alega, A. M. (2024). Estimación de las variables dinámicas de programación del riego en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 33(2). <https://cu-id.com/2177/v33n2e02>
- Gómez, G. C., Munive Cerrón, R., Mallma Capcha, T., y Orihuela Villavicencio, C. (2014). Evaluación de la tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas. *Apuntes Ciencias Sociales*, 4(1), 32–43.
- González Arroyo, S. (2022). *Ordenación del recurso forestal para optimizar los beneficios ambientales, sociales y económicos en la Ciudad de los Niños, Cartago, Costa Rica*. [Trabajo de graduación de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/13959/TF%209385_BIB308122_Sergio%20Gonzalez_Arroyo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hartnack, S., y Roos, M. (2021). Teaching: confidence, prediction and tolerance intervals in scientific practice: a tutorial on binary variables. *Emerging Themes in Epidemiology*, 18(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s12982-021-00108-1>
- Irrigation Australia Limited. (2017). *Irrigation System Design Guidelines*. <https://www.irrigationaustralia.com.au/downloads/eKnowledge/Resources/Irrigation-System-Design-Guidelines-V6.pdf?downloadable=1>

- Játiva-Reyes, M. F., Rentería-Regalado, J. G., Poma-Copa, M. P., y Sivisaca-Caraguay, J. R. (2019). Efecto de tres frecuencias de riego por goteo en la producción del cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris*). *Polo Del Conocimiento*, 4(4), 318. <https://doi.org/10.23857/pc.v4i4.984>
- Javadi, A., y Ostad-Ali-Askari, K. (2023). Effect of Different Irrigation Managements on Infiltration Equations and Their Coefficients. *CivilEng*, 4(3), 949–965. <https://doi.org/10.3390/civileng4030051>
- Jom García, H. A. (2021). *Estudio semidetallado de suelos con fines de riego en el cultivo de caña de azúcar (Saccharum officinarum L.) en Finca Pachonté, Mazatenango, Suchitepéquez* [Trabajo de graduación de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Kafkafi, U., y Kant, S. (2005). Fertigation. En *Encyclopedia of Soils in the Environment* (Vol. 4, pp. 1–9). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00227-7>
- Kafkafi, U., y Tarchitzky, J. (2012). *Fertirrigación: Una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua* (1º). Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA); Instituto Internacional de la Potasa (IIP). https://www.ipipotash.org/uploads/udocs/391-2012_ifa_ipi_fertirrigacion.pdf
- Lince-Salazar, L. A. (2021). Capacidad de almacenamiento de agua en suelos cultivados en café y otras propiedades edáficas relacionadas. *Revista Cenicafé*, 72(1), e72101. <https://doi.org/10.38141/10778/72101>
- Lin, L., Van der Bolt, F., y Cornelis, W. (2025). Predicting bulk density of soils with varying degree of structural degradation using single and multi-parameter based pedotransfer functions. *Soil and Tillage Research*, 250, 106503. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106503>
- Mahmoodi-Eshkaftaki, M., y Rafiee, M. R. (2021). A simple-to-use nomogram for reference evapotranspiration assessment using multivariate models: Study on outdoor and greenhouse environments. *Environmental Technology y Innovation*, 22, 101421. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101421>
- Maltas, A. S., Tavali, I. E., Uz, I., y Kaplan, M. (2022). Monitoring the effects of pH and EC regulated drip fertigation on microbial dynamics of calcareous soil in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivation under greenhouse conditions in a Mediterranean climate. *Scientia Horticulturae*, 306, 111448. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111448>
- Martins Guimarães, C., França da Cunha, F., Charles dos Santos Silva, F., Baldez Felismino Guimarães, A., Jose Henriques da Silva, D., y Teixeira de Oliveira, J. (2022). Cultivo protegido de alface com diferentes colorações de cobertura plástica Protected lettuce cultivation with different plastic cover colors. *AGRARIAN*, 15(55). <https://doi.org/10.5555/20220400451>

- Medina Jiménez, F. (2015). Necesidades nutricionales y de riego de la lechuga. *Revista Agropecuaria*, (22), 104–111. <https://revistas.grancanaria.com/index.php/GRANJA/article/view/9945>
- Mehta, N. A., y Savita. (2023). Protected Cultivation of Underutilized Vegetables. En *Production Technology of Underutilized Vegetable Crops* (pp. 309–324). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15385-3_16
- Ministerio de Agricultura y Riego (MIDAGRI). (2019). *Requerimientos Agroclimáticos del cultivo de cebolla*. <https://repositorio.midagri.gob.pe/handle/20.500.13036/621>
- Montero Delgado, G. (2021). *Automatización de un sistema de irrigación por goteo autocompensado mediante un controlador de válvulas hidráulicas accionadas por señal de radio* [Trabajo de graduación de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2021/12/TFG-GiovanlyMonteropractica.pdf>
- Nair, K. P. (2021). Onion and Garlic -Bulbous Spices. En *Minor Spices and Condiments* (pp. 3–21). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82246-0_2
- Niu, G., y Masabni, J. (2022). Hydroponics. En *Plant Factory Basics, Applications and Advances* (pp. 153–166). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85152-7.00023-9>
- Pacheco Zamora, D. (2018). *Efecto del manejo del riego sobre la morfofisiología del cultivo de Tomate (Solanum lycopersicum) híbrido Gladiador en hidroponía bajo ambiente protegido*. [Trabajo de graduación de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/6325/1/43769.pdf>
- Pearl Water Systems. (2017). *Pearl water pumps catalog: Catálogo de electrobombas*. <https://pdwatersystems.com/catalog/PEARL-CATALOGO-ELECTROBOMBAS.pdf>
- Petit, J., García, S. M., Molle, B., Bendoula, R., y Ait-Mouheb, N. (2022). Methods for drip irrigation clogging detection, analysis and understanding: State of the art and perspectives. *Agricultural Water Management*, 272, 107873. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107873>
- Pedrollo S.p.A. (2020). *Catálogo General 60 Hz* [Catálogo de productos]. <https://www.casadelriegoecuador.com/wp-content/uploads/2020/09/CATALOGO-GENERAL-PEDROLLO-60Hz.pdf>
- Phalempin, M., Lippold, E., Vetterlein, D., y Schlüter, S. (2021). Soil texture and structure heterogeneity predominantly governs bulk density gradients around roots. *Vadose Zone Journal*, 20(5), e20147. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20147>
- Piccoli, I., Schjøning, P., Lamandé, M., Furlan, L., y Morari, F. (2017). Challenges of conservation agriculture practices on silty soils. Effects on soil pore and gas transport characteristics in North-eastern Italy. *Soil and Tillage Research*, 172, 12–21. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2017.05.002>

- Programa de Servicios Agrícolas Provinciales (PROSAP). (2016). *Protocolo para evaluación de equipos de riego por goteo*. [Informe técnico] [http://www.prosap.gov.ar/Docs/Protocolo General para Evaluacion de Riego por Goteo.pdf](http://www.prosap.gov.ar/Docs/Protocolo%20General%20para%20Evaluacion%20de%20Riego%20por%20Goteo.pdf)
- Quesada Solís, A. E. (2021). *Estudio de prefactibilidad técnica y financiera para la implementación de un sistema integrado de fertirriego, abonado por biochar, con uso de energía solar y control automático, para productores de regiones rurales de Costa Rica en una zona de estudio*. [Trabajo de graduación de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. [https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/86787/Estudio de prefactibilidad técnica y financiera para la implementación de un sistema integrado de fertirriego%2C abonado por biochar%2C con uso de energía solar y control automático.pdf?sequence=2yi](https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/86787/Estudio%20de%20prefactibilidad%20t%C3%A9cnica%20y%20financiera%20para%20la%20implementaci%C3%B3n%20de%20un%20sistema%20integrado%20de%20fertirriego%20abonado%20por%20biochar%20con%20uso%20de%20energ%C3%ADa%20solar%20y%20control%20autom%C3%A1tico.pdf?sequence=2yi)
- Quesada-Roldám, G., y Bertsch-Hernández, F. (2012). Fertirriego en el rendimiento de híbridos de tomate producidos en invernadero. *Agronomía Costarricense*, 23(1), 117–128. https://www.mag.go.cr/rev_meso/v23n01_117.pdf
- Quirós Valverde, K. (2018). *Diseño de sistemas de riego por goteo para los productores de asoorgánicos, Pérez Zeledón*. [Trabajo de graduación de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11241/disen%C3%B3n_sistemas_riego_goteo .pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11241/disen%C3%B3n_sistemas_riego_goteo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ramadan, A., Hashem, M., Ghanem, H., Mostafa, H., Allam, A. (2024). Impact of pulsed drip irrigation and organo-mineral N-fertilization on improving sandy soil properties and limon production. *Water Science*, 38(1), 460–474. <https://doi.org/10.1080/23570008.2024.2387959>
- Rodríguez Bejarano, E. (2018). *Instalación y evaluación de sistemas de riego por goteo para el cultivo de hortalizas en casa sombra para la región chorotega y brunca bajo el marco del proyecto “Mesoamérica sin hambre” de la representación de la FAO en Costa Rica*. [Trabajo de graduación de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/9968>
- Rodríguez García, J. P., y Vega Triana, J. A. (2022). *Dinámica temporal de la calidad del agua para fertirriego empleada en cultivos de clavel, efectos sobre la calidad de la solución nutritiva*. [Trabajo de graduación de licenciatura, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano]. <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/30991?locale-attribute=pt>
- Rodríguez Villegas, A. J. (2022). *Sistema de riego por goteo y fertirriego automatizado con sensores de humedad y telemetría para maíz (zea mays) jicaral, Puntarenas, 2020*. [Trabajo de graduación de licenciatura, Universidad Técnica Nacional]. [https://repositorio.utn.ac.cr/bitstream/handle/20.500.13077/745/SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.utn.ac.cr/bitstream/handle/20.500.13077/745/SISTEMA%20DE%20RIEGO%20POR%20GOTEO.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Rosales-Naranjo, L., Pérez-Rodríguez, M., Herrera-Puebla, J., González-Rodríguez, J. A., y Cid-Lazo, G. (2020). Efecto del manejo del suelo sobre la infiltración en un suelo Ferralítico Rojo compactado. *Ingeniería Agrícola*, 10(4). <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/1306>
- Sabzevari, Y., y Eslamian, S. (2023). Reference evapotranspiration in water requirement: Theory, concepts, and methods of estimation. En *Handbook of Hydroinformatics* (pp. 269–289). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821961-4.00005-1>
- Salamanca Jiménez, A., y Sadeghian Khalajabadi, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé*, 56(4), 381–397. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc056%2804%29381-397.pdf>
- Sánchez, L. D., y Viáfara, C. A. (2012). Impacto de los sólidos suspendidos totales sobre la obstrucción en emisores de riego localizado de alta frecuencia. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, 16(2), 199–210. <https://doi.org/10.25100/iyc.v16i2.3695>
- Sánchez Pérez, J. C., Lugo Leyte, R., & Lugo Méndez, H. D. (2014, septiembre). *Evaluación del comportamiento de una bomba centrífuga* [Ponencia presentada]. XIV Congreso y Exposición Latinoamericana de Turbomaquinaria, Ciudad de México, México. https://www.researchgate.net/profile/Raul-Leyte/publication/359693559_EVALUACION_DEL_COMPORTEAMIENTO_DE_UNA_BOMBA_CENTRIFUGA/links/624889d021077329f2eb8ac0/EVALUACION-DEL-COMPORTEAMIENTO-DE-UNA-BOMBA-CENTRIFUGA.pdf
- Savva, A. P., y Frenken, K. (2002). *Irrigation Manual: Planning, development monitoring and evaluation of irrigated agriculture with farmer participation. Volumen II, Modulo 7*. Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Oficina Subregional para África Oriental y Meridional (SAFR). <https://www.fao.org/4/ai596e/ai596e00.htm>
- Sarandón, S. J. (2020). *El papel de la agricultura en la Transformación Social-Ecológica de América Latina*. Friedrich-Ebert-Stiftung (FES). https://www.researchgate.net/publication/345777972_El_papel_de_la_agricultura_en_la_transformacion_social-ecologica_de_America_Latina
- Seed Co Group. (2021a). *Field Tomato Production Guide*. <https://seedcogroup.com/bw/vegetables/wp-content/uploads/2021/12/Field-Tomato.pdf>
- Seed Co Group. (2021b). *Lettuce Production Guide*. <https://seedcogroup.com/bw/vegetables/wp-content/uploads/2021/12/Lettuce.pdf>
- Shahena, S., Rajan, M., Chandran, V., y Mathew, L. (2021). Conventional methods of fertilizer release. En *Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture* (pp. 1–24). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819555-0.00001-7>
- Song, K., Qin, Q., Yang, Y., Sun, L., Sun, Y., Zheng, X., Lv, W., y Xue, Y. (2022). Drip fertigation and plant hedgerows significantly reduce nitrogen and phosphorus losses and maintain high

- fruit yields in intensive orchards. *Journal of Integrative Agriculture*, 22(2) 598–610. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.08.008>
- Soto-Bravo, F., y Betancourt-Flores, A. (2024). Comportamiento vegetativo-generativo de tomate y chile dulce hidropónico en invernadero, sometidos a agotamiento hídrico. *Agronomía Costarricense*, 48(1), 09–26. <http://dx.doi.org/10.15517/rac.v48i1.59106>
- Soto-Bravo, F., y Rodríguez-Ocampo, G. A. (2021). Crecimiento, evapotranspiración y uso de nutrientes en cultivo hidropónico de *Eryngium foetidum*, en dos diferentes ambientes y niveles de nutrición. *Agronomía Costarricense*, 45(1), 19–40. <https://doi.org/10.15517/RAC.V45I1.45674>
- Taha, A. M. (2022). Fertilizers for Fertigation. En A. M. Taha (Ed.), *Fertigation: A Comprehensive Guide for Sustainable Agriculture* (pp. 25–33). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05596-6_3
- Tangwongkit, B., Tanwonkit, R., y Chontanaswat, P. (2014). Drip irrigation powered by solar cell for dry rainfed and no electricity area. En *International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE)* (pp. 1–4). <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/document/6828936>
- Úbeda Rivera, J. S., y Delgado Dallatorre, Y. (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 4(7), 889–896. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6299>
- Valverde Conejo, J. C. (2022). *Sistemas de riego por goteo*. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-2235.pdf>
- Vargas González, J. (2022). *Medición del efecto de dos sistemas de labranza en un cultivo de zanahoria en paso ancho de Oreamuno de Cartago*. [Trabajo de graduación de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/14004/TF9262_BIB307238_Joseph_Vargas_Gonzalez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Villalobos Flores, R., Carvajal Tobar, K., Nury, S. V., Calvo Méndez, M., y Granados Jiménez, R. (2017). Climatología general del cantón El Guarco, Provincia de Puntarenas. Instituto Meteorológico Nacional (IMN). <http://cgloba.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/DescripciondelClimaSERIE/DescripcionClimaCantonElGuarco/offline/download.pdf>
- Vishwakarma, D. K., Kumar, R., Tomar, A. S., y Kuriqi, A. (2023). Eco-hydrological modeling of soil wetting pattern dimensions under drip irrigation systems. *Heliyon*, 9(7), e18078. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18078>
- Wang, Y., Li, S., Qin, S., Guo, H., Yang, D., y Lam, H.-M. (2020). How can drip irrigation save water and reduce evapotranspiration compared to border irrigation in arid regions in

- northwest China. *Agricultural Water Management*, 239, 106256.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106256>
- Ganpat, W. G., y Isaac, W.-A. P. (2012). *Sustainable Food Production Practices in the Caribbean* (Vol. 1). Carlong Publishers.
- Williams Chavarría, G. M. (2011). *Evaluación de la uniformidad de un sistema de riego por goteo de baja presión*. [Trabajo de graduación de licenciatura, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano].
- Zermeño González, A., Cruz Santes, C. I., Munguía López, J. P., Catalán Valencia, E. A., Campos Magaña, S. G., y Cortés Bracho, J. de J. (2014). Efecto del sistema de riego y clima en la eficiencia del uso de agua de nogal pecanero. *Terra Latinoamericana*, 32(1), 23–33.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v32n1/2395-8030-tl-32-01-00023.pdf>
- Zotarelli, L., Dukes, M. D., y Morgan, K. T. (2019). Interpretation of Soil Moisture Content to Determine Soil Field Capacity and Avoid Over-Irrigating Sandy Soils Using Soil Moisture Sensors. EDIS. <https://doi.org/10.32473/edis-ae460-2010>
- Zúñiga, D., y Mendoza, R. (2021). *Gestión y manejo del agua en la agricultura*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)
<https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/19866/CDHN22038298e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

9. Anexos

Cuadro 11. Caudal disponible para el riego y fertirriego en la Ciudad de los Niños, Cartago.

Tiempo (s)	Volumen (L)	Caudal (L/s)	Caudal (m ³ /h)
6.80	8.21	1.21	4.35
7.71	8.50	1.10	3.97
7.70	9.00	1.17	4.21
Promedio		1.16	4.17 ± 0.19

Memoria de cálculo diseño agronómico

Cuadro 12. Datos conocidos y utilizados en el diseño del sistema de riego implementado en la Ciudad de los Niños, Cartago.

Dato conocido	Tomate	Lechuga hidropónica	Lechuga	Cebolla
ET ₀ (mm/día)	2.6	2.6	3.5	3.5
K _c	1.15	1	1	1.05
CC (%)	43	43	43	43
PMP (%)	35	35	35	35
DA (g/cm ³)	1.12	1.12	1.05	1.05
P _r (cm)	40	20	20	20
A _g (%)	10	15	21	22
E _f (%)	95	95	95	95
Distancia entre goteros (m)	0.30	0.30	0.30	0.30
Distancia entre laterales de riego (m)	1.40	0.50	1.00	1.00
Caudal por gotero (m ³ /h)	0.002	0.002	0.001	0.001
Área de operación (m ²)	240	100	270	400

Cuadro 13. Ecuaciones utilizadas para calcular los parámetros de riego de los cultivos de tomate, lechuga hidropónica, lechuga en suelo y cebolla implementados en la Ciudad de los Niños, Cartago. La cita mostrada indica el documento de donde fue extraída la operación para su uso.

Parámetro	Ecuación	Cita
ET _c	$ET_C = ET_0 \cdot K_C$	Allen et al. (1998)
Lámina neta (L _n)	$L_n = \frac{10 \cdot (CC - PMP)}{100} \cdot DA \cdot P_r \cdot \frac{A_g}{100}$	Jom García (2021)
Lámina bruta (L _b)	$L_b = \frac{L_n}{E_f}$	Jom García (2021)
Área de Riego por gotero (A _{riego g})	$A_{riego\ g} = \text{distancia entre goteros} \cdot \text{distancia entre camas}$	Jom García (2021)
Precipitación (P _{re})	$P_{re} = \left(\frac{\text{Caudal por gotero}}{\text{Área de riego por gotero}} \right) \cdot 1000$	Jom García (2021)
Tiempo de operación (T _{op})	$T_{op} = \frac{L_b}{P_{re}}$	Quirós Valverde (2019)
Goteros totales (Go _T)	$Go_T = \frac{\text{Área de operación}}{A_{riego\ g}}$	
Caudal teórico (Q _t)	$Q_t = Go_T \cdot \text{Caudal por gotero}$	

En el caso del cálculo de la precipitación para la lechuga hidropónica se calculó de la siguiente forma:

$$P_{re} = \frac{1\ m}{0.3\ m} \cdot 2\ \text{líneas de goteo} \cdot 2.2\ \frac{l}{h} = 14.67\ l/h/m^2 = 14.67\ \frac{mm}{h}$$

Cuadro 14. Valores calculados para el riego de los cultivos de tomate, lechuga hidropónica, lechuga en suelo y cebolla implementados en la Ciudad de los Niños, Cartago.

Parámetro	Tomate	Lechuga hidropónica	Lechuga	Cebolla
ET _c (mm/día)	2.99	2.60	3.50	3.68
L _n (mm/día)	3.58	2.69	3.53	3.70
L _b (mm/día)	3.77	2.83	3.71	3.89
A _{riego g} (m ²)	0.42	0.30	0.15	0.15
P _{re} (mm/h)	5.24	14.67	7.33	7.33
Tiempo de operación total (minutos)	43.21	11.58	30.38	31.83
Goteros totales	571	667	1800	2667
Caudal teórico (m ³ /h)	1.26	1.47	1.98	2.93

Memoria de cálculo diseño hidráulico

Divisores

Cuadro 15. Pérdidas de carga por fricción en la tubería secundaria del riego por goteo implementado en la Ciudad de los Niños, Cartago, para el cultivo de tomate en ambiente protegido.

Tramo	L total (m)	Caudal (m ³ /h)	Diámetro (mm)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	H _f (mca)	H _f acumulada (mca)	Presión (mca)	Variación presión (%)
1	1.40	1.19	56.63	0.0025	0.13	0.00067	0.0007	10.25	
2	2.80	1.02	56.63	0.0025	0.11	0.00050	0.0012	10.25	0.00
3	4.20	0.85	56.63	0.0025	0.09	0.00036	0.0015	10.25	0.00
4	5.60	0.68	56.63	0.0025	0.07	0.00024	0.0018	10.25	0.00
5	7.00	0.51	56.63	0.0025	0.06	0.00014	0.0019	10.25	0.00
6	8.40	0.34	56.63	0.0025	0.04	0.00007	0.0020	10.25	0.00
7	9.80	0.17	56.63	0.0025	0.02	0.00002	0.0020	10.25	0.00

Cuadro 16. Pérdidas de carga por fricción en la tubería secundaria del riego por goteo implementado en la Ciudad de los Niños, Cartago, para el cultivo de lechuga hidropónica en ambiente protegido.

Tramo	L total (m)	Caudal (m ³ /h)	Diámetro (mm)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	H _f (mca)	H _f acumulada (mca)	Presión (mca)	Variación presión (%)
1	6.8	1.47	30.36	0.0007	0.57	0.10	0.10	10.28	
2	9.8	1.18	30.36	0.0007	0.45	0.03	0.13	10.25	0.29
3	12.8	0.88	30.36	0.0007	0.34	0.02	0.15	10.23	0.17
4	15.8	0.59	30.36	0.0007	0.23	0.01	0.16	10.22	0.08
5	18.8	0.29	30.36	0.0007	0.11	0.00	0.16	10.22	0.00

Cuadro 17. Pérdidas de carga por fricción en la tubería secundaria del riego por goteo implementado en la Ciudad de los Niños, Cartago, para el cultivo de cebolla en campo abierto.

Tramo	L total (m)	Caudal (m ³ /h)	Diámetro (mm)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	H _f (mca)	H _f acumulada (mca)	Presión (mca)	Variación presión (%)
1	0.5	2.77	56.63	0.003	0.31	0.0011	0.0011	10.22	
2	1.5	2.59	56.63	0.003	0.29	0.0020	0.0032	10.22	0.02
3	2.5	2.40	56.63	0.003	0.26	0.0018	0.0049	10.22	0.02
4	3.5	2.22	56.63	0.003	0.24	0.0015	0.0065	10.22	0.01
5	4.5	2.03	56.63	0.003	0.22	0.0013	0.0077	10.22	0.01
6	5.5	1.85	56.63	0.003	0.04	0.0001	0.0078	10.22	0.00
7	6.5	1.66	56.63	0.003	0.18	0.0009	0.0087	10.22	0.01
8	7.5	1.48	56.63	0.003	0.16	0.0007	0.0094	10.22	0.01
9	8.5	1.29	56.63	0.003	0.14	0.0006	0.0100	10.22	0.01
10	9.5	1.11	56.63	0.003	0.12	0.0004	0.0104	10.22	0.00
11	10.5	0.92	56.63	0.003	0.10	0.0003	0.0107	10.22	0.00
12	11.5	0.74	56.63	0.003	0.08	0.0002	0.0109	10.22	0.00
13	12.5	0.55	56.63	0.003	0.06	0.0001	0.0110	10.22	0.00
14	13.5	0.37	56.63	0.003	0.04	0.0001	0.0111	10.22	0.00
15	14.5	0.18	56.63	0.003	0.02	0.0000	0.0111	10.22	0.00

Cuadro 18. Pérdidas de carga por fricción en la tubería secundaria del riego por goteo implementado en la Ciudad de los Niños, Cartago, para el cultivo de lechuga en campo abierto.

Tramo	L total (m)	Caudal (m ³ /h)	Diámetro (mm)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	H _f (mca)	H _f acumulada (mca)	Presión (mca)	Variación presión (%)
1	0.50	1.86	56.63	0.003	0.21	0.00	0.00	10.20	
2	1.50	1.73	56.63	0.003	0.19	0.00	0.00	10.20	0.01
3	2.50	1.58	56.63	0.003	0.17	0.00	0.00	10.20	0.01
4	3.50	1.44	56.63	0.003	0.16	0.00	0.00	10.20	0.01
5	4.50	1.29	56.63	0.003	0.14	0.00	0.00	10.20	0.01
6	5.50	1.14	56.63	0.003	0.13	0.00	0.00	10.20	0.00
7	6.50	0.99	56.63	0.003	0.11	0.00	0.00	10.20	0.00
8	7.50	0.83	56.63	0.003	0.09	0.00	0.00	10.20	0.00
9	8.50	0.67	56.63	0.003	0.07	0.00	0.00	10.20	0.00
10	9.50	0.51	56.63	0.003	0.06	0.00	0.00	10.20	0.00
11	10.50	0.34	56.63	0.003	0.04	0.00	0.00	10.20	0.00
12	11.50	0.17	56.63	0.003	0.02	0.00	0.00	10.20	0.00

Principal

Cuadro 19. Pérdidas de carga por fricción en la tubería principal del riego por goteo implementado en la Ciudad de los Niños, Cartago, para los cultivos estudiados.

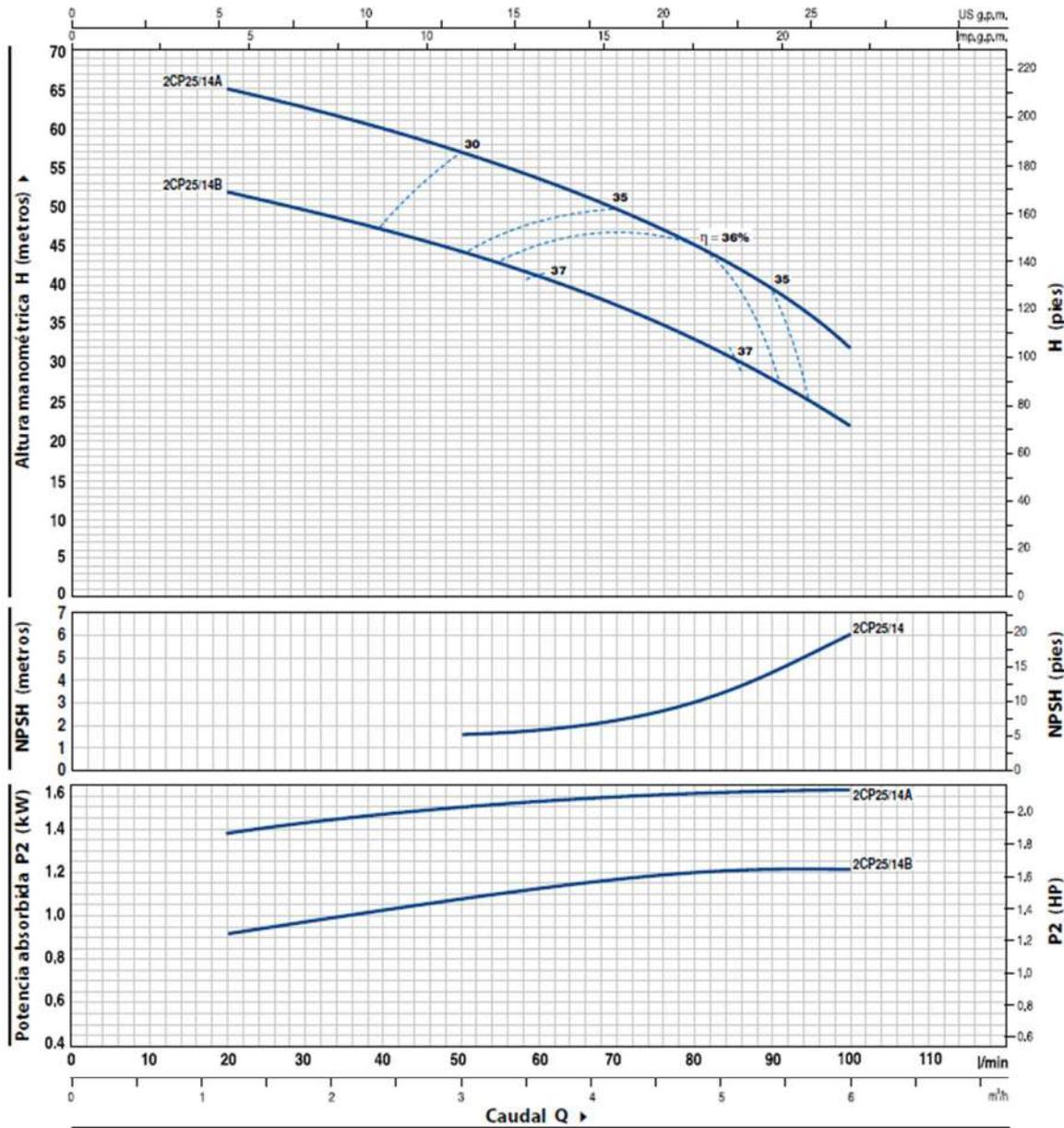
Cultivo	Tramo	L (m)	Caudal (m ³ /h)	Diámetro (mm)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	H _f (mca)	Presión (mca)	Variación presión (%)
Cebolla	A-B	11.6	2.77	38.9	0.0012	0.65	0.17	12.23	0.00
	B-G	25.3	2.77	30.36	0.0007	1.06	1.21	11.01	9.91
Tomate	A-B	11.6	1.19	38.9	0.0012	0.28	0.03	12.25	0
	B-G	10.4	1.19	30.36	0.0007	0.46	0.10	12.15	0.84
Lechuga hidropónica	A-B	11.6	1.47	38.9	0.0012	0.34	0.05	12.33	0.00
	B-D	5.6	1.47	30.36	0.0007	0.57	0.08	12.25	0.68
Lechuga	A-B	11.6	1.86	38.9	0.0012	0.44	0.08	12.20	0.00
	B-H	34.5	1.86	30.36	0.0007	0.72	0.79	11.41	6.49

Cuadro 20. Valores utilizados para calcular las pérdidas de carga por accesorios (h_m). Los coeficientes de pérdida (K_L) se obtuvieron de (Çengel y Cimbala, 2018)

Accesorio	K _L	Cantidad	Velocidad (m/s)	h _m (mca)
Codo 90°	0.3	12		0.206
Tee	0.2	10		0.114
Válvula de bola	0.05	7	1.06	0.020
Contracción 1 1/4 a 1	0.1	1		0.006
Expansión 1 a 2	0.5	1		0.029
h _m total				0.375

En el caso del cálculo del NPSH disponible se realizó mediante la ecuación 5 con los siguientes valores:

$$NPSH_{disp} = 10.33 \text{ m} + 0 \text{ m} - 0.30 \text{ m} - 7.38 \text{ m} - 0.30 \text{ m} = 2.65 \text{ m}$$



MODELO		POTENCIA		Q	H													
Monofásica	Trifásica	kW	HP		m³/h	0	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0			
2CPm 25/14B	2CP 25/14B	1.1	1.5	l/min	0	20	30	40	50	60	70	80	90	100				
2CPm 25/14A	2CP 25/14A	1.5	2	H metros	54	52	50	47.5	44.5	41	37	33	28	22				
					67	65	62	60	57	54	50	45	40	32				

Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración

Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO 9906 Grade 3.

Figura 17. Curva característica de la bomba hidráulica recomendada Pedrollo modelo 2CP25/14B para un mejor funcionamiento del sistema de riego ubicado en la Ciudad de los Niños, Cartago con un caudal máximo de trabajo de 3 m³/h y una carga dinámica total de 40 m. Tomado de Pedrollo S.p.A. (2020).

Planes de Fertilización

Los planes de fertilización no proporcional basados en Bertsh Hernández (2009), detallados en los cuadros 21, 22, 23 y 24 especifican la cantidad de kilogramos de cada fertilizante a aplicar según el día post-trasplante de cada cultivo. Estos planos de fertilización fueron revisados por un ingeniero agrónomo especialista en fitotecnia (Mora Monge, 2024). En los días de fertilización programados, se pesan los fertilizantes tabulados y se disuelven completamente en el balde de mezcla, desde donde el sistema Venturi realizará la succión. Tras la preparación de esta solución, se ajustan las llaves de bola para activar el Venturi entre 30 y 60 segundos después del inicio del riego.

Cuadro 21. Plan de fertilización no proporcional para el cultivo de tomate.

Fertilizante	Días después de trasplante											
	3	10	17	24	31	38	45	52	60	67	74	81
	kg/240 m ²											
Nitrato de amonio	0.48	0.48	0.72	0.96	0.96	0.84	0.72	0.72	0.36	0.36	0.36	0.36
MAP	0.24	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.36	0.36	0.36	0.36
Nitrato de potasio	0.00	0.24	0.12	0.24	0.24	0.24	0.36	0.36	0.36	0.48	0.48	0.48
Sulfato de potasio	0.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.36	0.48	0.48	0.48
Nitrato de calcio	0.00	0.00	0.12	0.12	0.24	0.24	0.24	0.36	0.36	0.36	0.48	0.48
Sulfato de Magnesio	0.12	0.12	0.12	0.12	0.24	0.24	0.24	0.24	0.36	0.36	0.36	0.36
Sulfato de Zinc	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ácido Bórico	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Cuadro 22. Continuación plan de fertilización no proporcional para el cultivo de tomate.

Fertilizante	Días después de trasplante												
	88	95	102	109	116	123	130	137	144	151	158	165	
	kg/240 m ²												
Nitrato de amonio	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.00
MAP	0.36	0.36	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Nitrato de potasio	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
Sulfato de potasio	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.36	0.36	0.00
Nitrato de calcio	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
Sulfato de Magnesio	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.00
Sulfato de Zinc	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ácido Bórico	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 23. Plan de fertilización no proporcional para el cultivo de cebolla.

Fertilizante	Días después de trasplante												
	3	10	17	24	31	38	45	52	60	67	74	81	91
	kg/400 m ²												
Nitrato de amonio	0.2	1.00	2.00	2.00	1.00	1.00	0.80	0.80	0.60	0.60	0.40	0.40	0.40
MAP	0.01	0.60	1.20	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.40	0.40	0.40	0.00	0.00
Nitrato de potasio	0.01	0.00	0.00	0.40	0.40	0.60	0.60	0.80	0.80	0.80	0.80	0.60	0.00
KCL	0.00	0.40	0.80	0.60	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00
Sulfato de potasio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.60	0.60	0.60
Nitrato de calcio	0.00	0.20	0.20	0.00	0.20	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Sulfato de Magnesio	0.01	0.20	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.40	0.40	0.40
Sulfato de Zinc	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00
Ácido Bórico	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00

Cuadro 24. Plan de fertilización proporcional para el cultivo de lechuga.

Fertilizante	Días después de trasplante							
	3	7	10	14	17	21	24	28
	kg/270 m²							
Nitrato de amonio	0.36	0.36	0.36	1.60	1.60	0.36	0.36	0.36
MAP	0.12	0.12	0.12	0.37	0.37	0.12	0.12	0.12
Sulfato de potasio	0.53	0.53	0.53	1.58	1.58	0.53	0.53	0.53
Nitrato de calcio	0.36	0.36	0.36	1.09	1.09	0.36	0.36	0.36
Sulfato de Magnesio	0.41	0.41	0.41	1.23	1.23	1.24	0.41	0.41
Sulfato de Zinc	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Ácido Bórico	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01

En el caso de la lechuga hidropónica, se aplica una fertilización proporcional cuyo plan se detalla en el cuadro 25 y está basado en la solución universal nutritiva de Steiner, cuya concentración final de cada uno de los elementos se muestra en el cuadro 26. La preparación de esta solución nutritiva se realiza en el tanque de 500 L ubicado en el cabezal de riego (Figura 11). Para ello, se pesan los fertilizantes y se incorporan al tanque junto con los 500 L de agua para su completa disolución. Esta aplicación se lleva a cabo diariamente, lo que requiere el ajuste de las llaves de paso en el cabezal de riego para iniciar la irrigación con la solución preparada. La solución debe renovarse cada vez que el tanque se vacíe, manteniéndose esta rutina durante todo el ciclo de cultivo de la lechuga.

Cuadro 25. Plan de fertilización para el cultivo de lechuga hidropónica.

Fuentes de fertilizante	Cantidad de fertilizante para 500 litros (g)
Nitrato de calcio	494.59
Sulfato de Magnesio	247.47
Nitrato de potasio	45.63
Fosfato Monopotásico	68.04
Sulfato de Potasio	225.66
Quelato de hierro	15.00
Sulfato de Manganeso	0.95
Ácido Bórico en polvo	1.26
Sulfato de zinc	0.15
Sulfato de cobre	0.04
Molibdato de Sodio	0.01

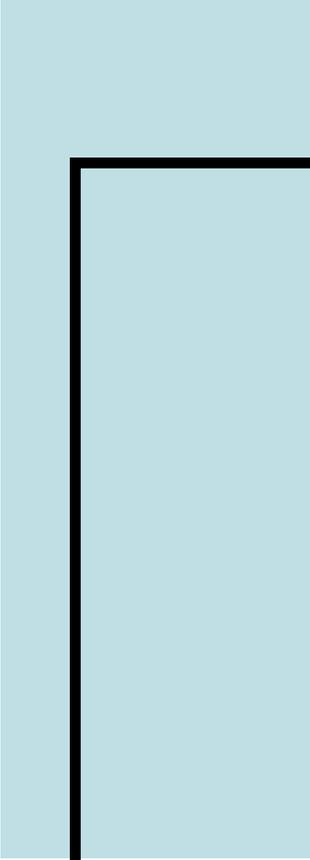
Cuadro 26. Solución universal nutritiva de Steiner implementada en el plan de fertilización para la lechuga hidropónica. Tomado de Asao (2012).

Elemento	Concentración (ppm)
Nitrógeno	167
Fosforo	31
Potasio	277
Magnesio	49
Calcio	183
Azufre	146
Hierro	3
Manganeso	1.97
Boro	0.44
Zinc	0.11
Cobalto	0.02
Molibdeno	0.007

Proceso de instalación del sistema

Cuadro 27. Comparación del estado del sitio de estudio antes de instalar el sistema de riego propuesto y después de su implementación.

Sitio	Antes	Después
Cabezal de riego		
Ambiente protegido		
Campo abierto		



MANUAL SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO Y FERTIRRIEGO

CIUDAD DE LOS NIÑOS

Elaborado por Sofía Madrigal Ramírez

Tabla de contenido

Ubicación	03
Método de siembra	04
Parámetros de riego	05
Planos	06
Planes de fertirriego	10
Recomendaciones	16

Ubicación

El sistema de fertirriego se instaló para el ambiente protegido y dos lotes a campo abierto, como se observa en la Figura 1. Dentro del ambiente protegido, el diseño se realizó para tomate cultivado en lomillos en una de las mitades del invernadero y en la otra para un sistema hidropónico de lechuga sembrada en bancales.

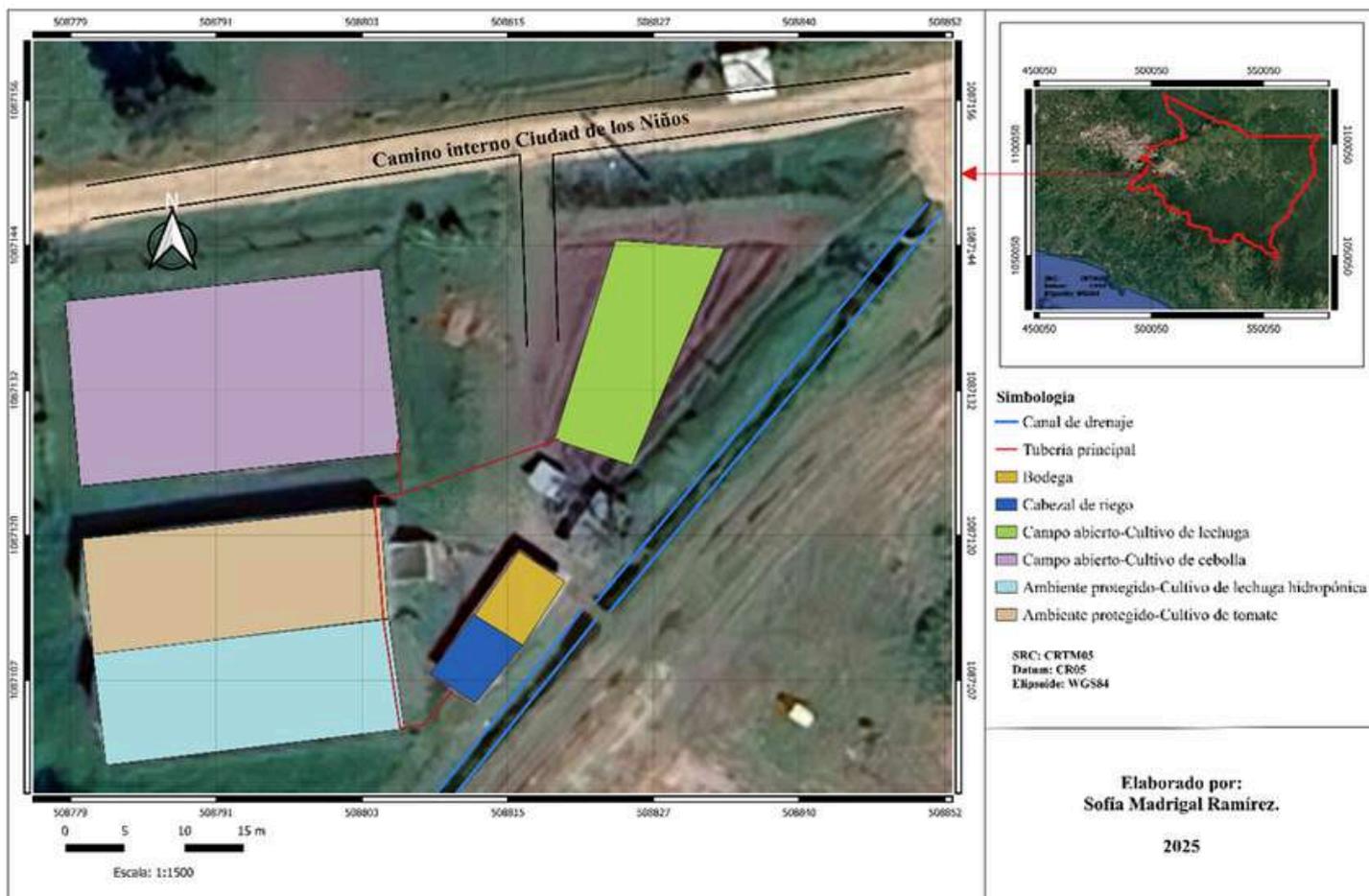
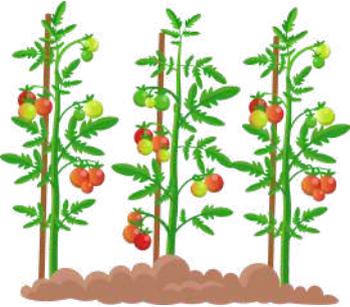


Figura 1. Ubicación de los lotes de siembra de hortalizas en la Ciudad de los Niños, donde se implementó el sistema de fertirriego diseñado. Elaboración propia (QGIS versión 3.34.11, 2025)



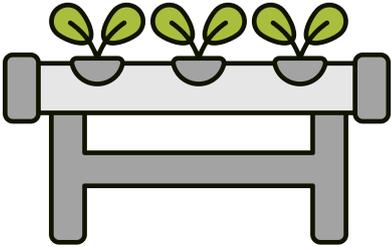
Método de siembra

El sistema de fertirriego se diseñó con la siguiente método de siembra para cada cultivo:



Tomate

Lomillos a una distancia entre centros de 70 cm. Separación entre plantas de 40 cm.



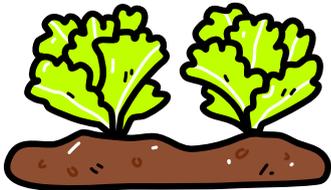
Lechuga hidropónica

Bancales con un ancho de 1 m y una altura de 1 m. Separación entre plantas de 15 cm.



Cebolla

Camas de 60 cm de ancho con desagües de 40 cm. Separación entre plantas de 20 cm.



Lechuga

Camas de 60 cm de ancho con desagües de 40 cm. Separación entre plantas de 20 cm.



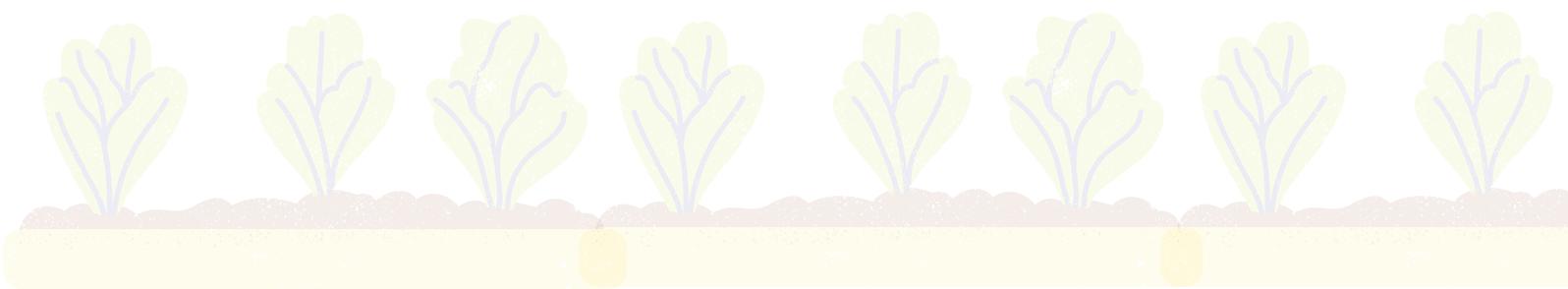
Parámetros de riego

El sistema de riego por goteo debe ser operado según los parámetros que se indican en la tabla 1. Cada uno de los cuatro lotes se sugiere que se rieguen individualmente diariamente durante el tiempo que se indica en la tabla. Se recomienda que el riego se realice en tres aplicaciones diarias durante el tiempo indicado en la fila correspondiente a “Pulsos de riego (3 veces al día) (minutos)”.

Tabla 1. Valores calculados de los parámetros utilizados en la programación de riego por goteo, separados por cultivo, ubicados en la Ciudad de los Niños.

Parámetro	Tomate	Lechuga hidropónica	Lechuga	Cebolla
Separación entre centro de camas/lomillos (m)	0,7	2,0	1,5	1,5
Separación entre plantas (m)	0,40	0,15	0,20	0,20
Frecuencia (día)	1	1	1	1
Lámina bruta (mm)	3,8	2,8	3,7	3,9
Tiempo total de riego (minutos)	43,2*	11,6	30,4	31,8
Pulsos de riego (3 veces al día) (minutos)	14,4	3,9	10,1	10,6
Caudal total requerido (m ³ /h)	1,3	1,5	2,0	2,9

Nota 1*: En caso de que se desee colocar una cinta de goteo por lomillo para el cultivo de tomate, el tiempo total de riego a aplicar debe ser la mitad del indicado en la tabla 1.



Planos - Ambiente protegido

El plano de la figura 2 corresponde al del invernadero, tanto para el cultivo de tomate (sección superior en el plano) como para la lechuga hidropónica (parte inferior en el plano). En el caso del tomate, se recomienda que se coloque una cinta de goteo de lomillo por medio y para la lechuga hidropónica colocar dos cintas por bancal.

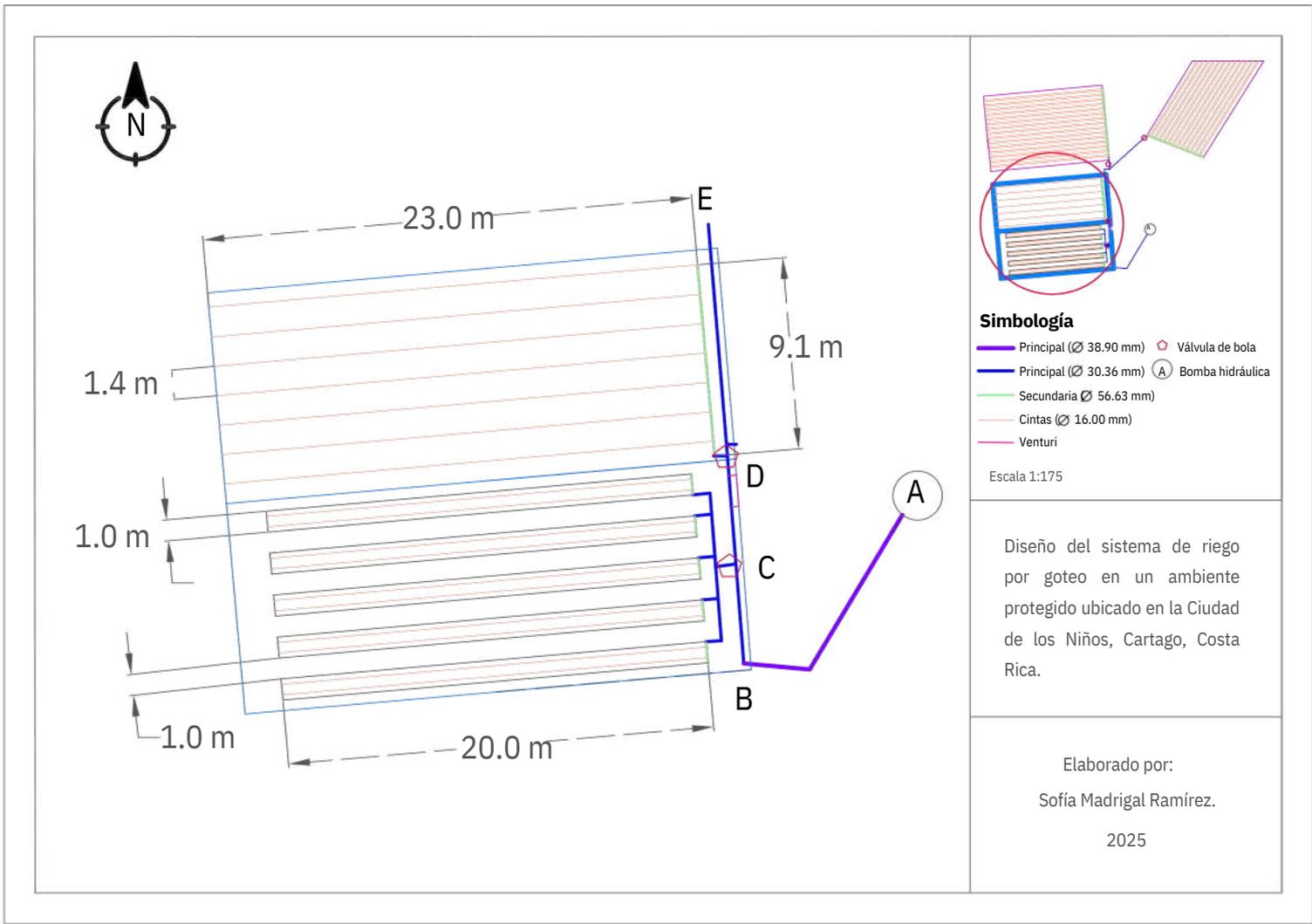


Figura 2. Plano de distribución de tuberías primarias, secundarias y cintas de goteo en el ambiente protegido para la implementación del riego por goteo en la Ciudad de los Niños, Cartago. Elaboración propia en el programa AutoCAD, versión 2025.



Planos - Campo abierto



El plano de la figura 3 corresponde al lote a campo abierto para el cultivo de cebolla. Se recomienda que se coloquen dos cintas de goteo por cama.

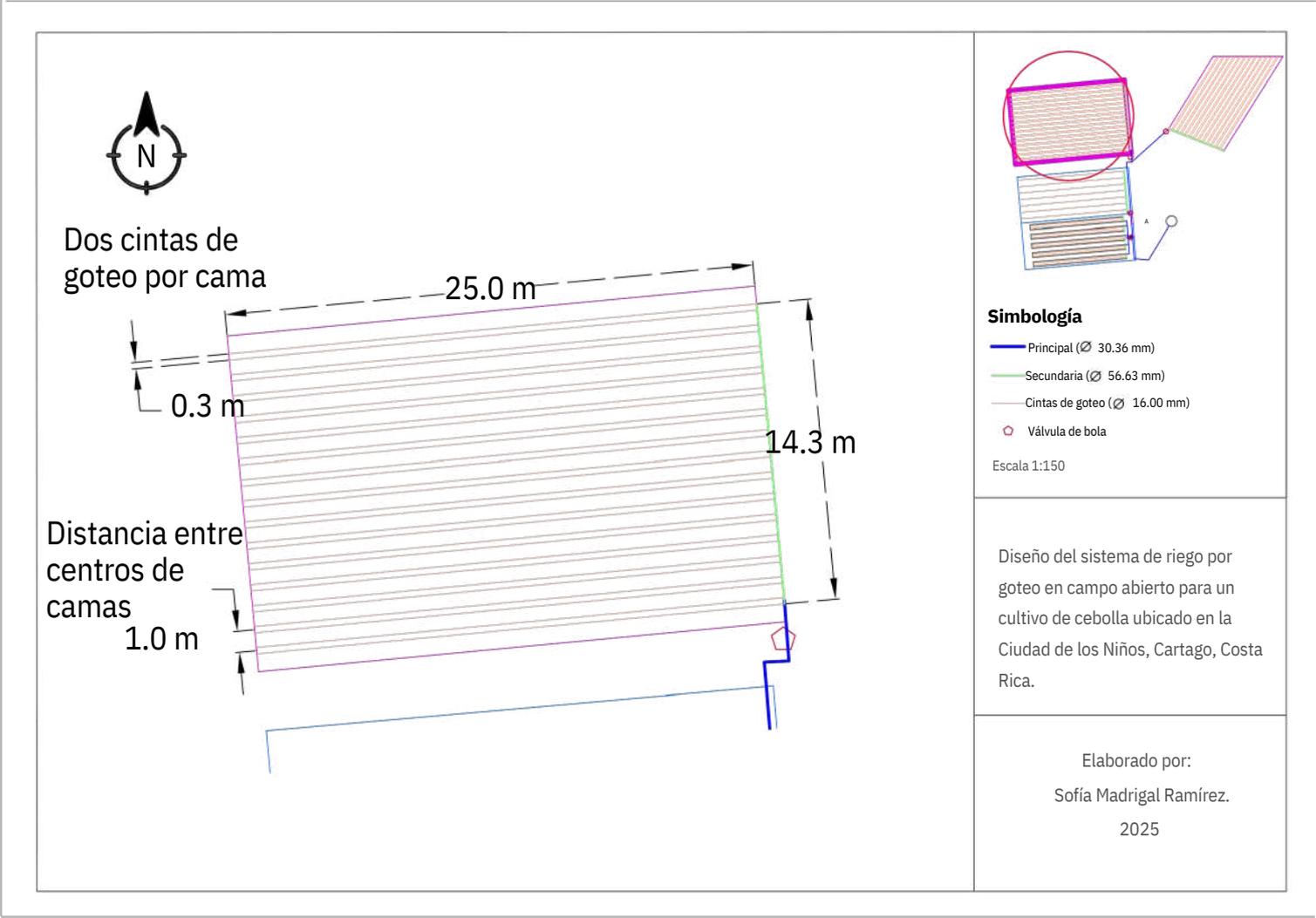


Figura 3. Plano de distribución de tuberías primarias, secundarias y cintas de goteo en campo abierto destinado a la siembra de cebolla para la implementación del riego por goteo en la Ciudad de los Niños, Cartago. Elaboración propia en el programa AutoCAD, versión 2025.



Planos - Campo abierto



El plano de la figura 4 corresponde al lote a campo abierto para el cultivo de lechuga. Se recomienda que se coloquen dos cintas de goteo por cama.

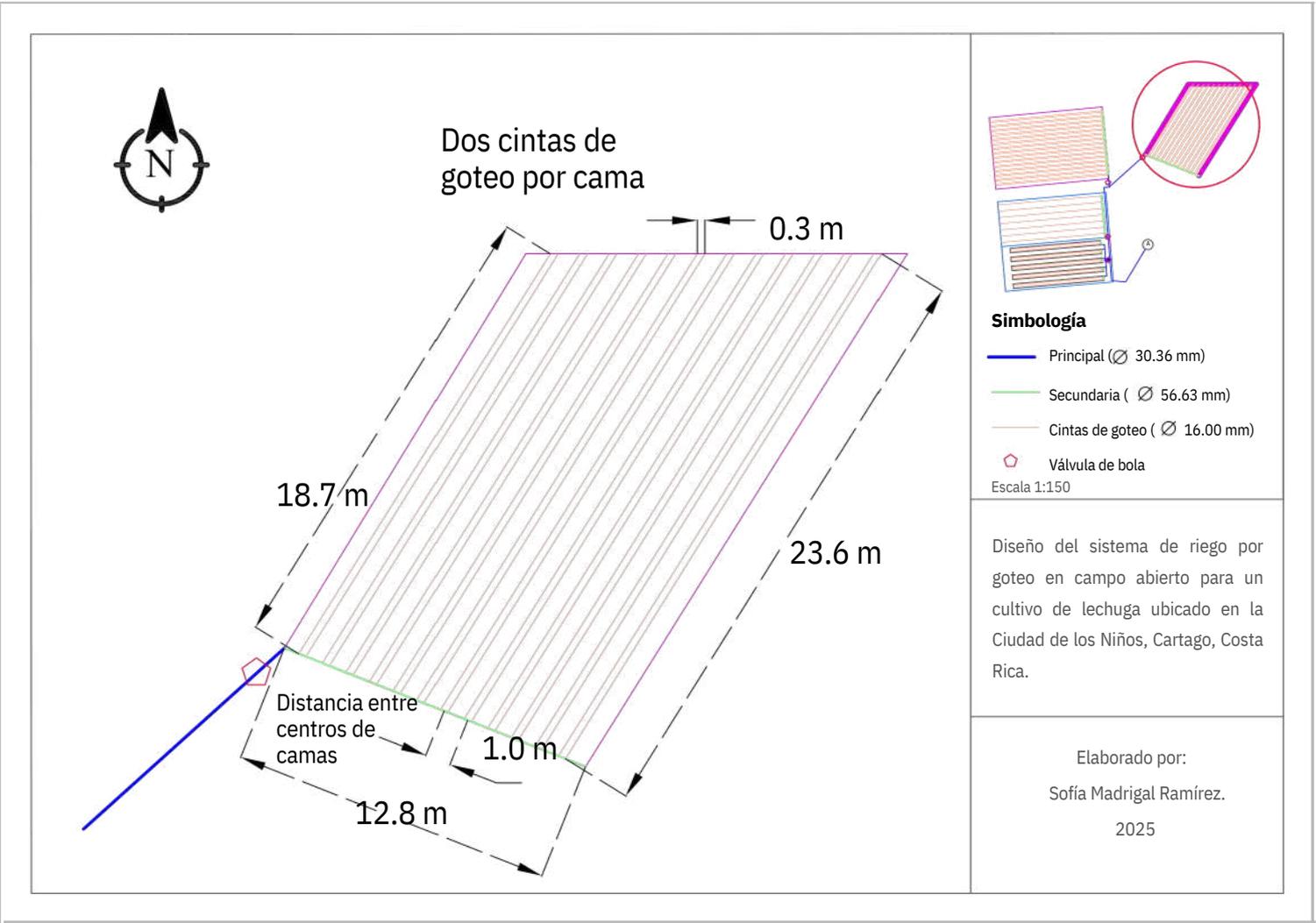
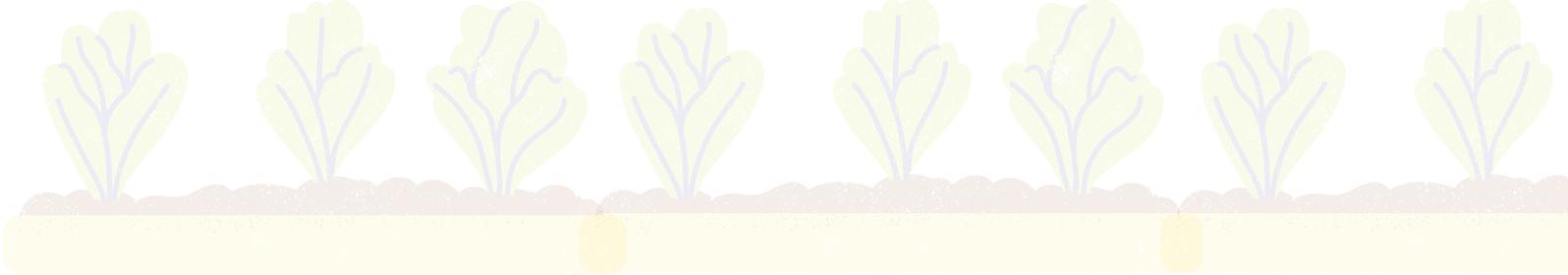


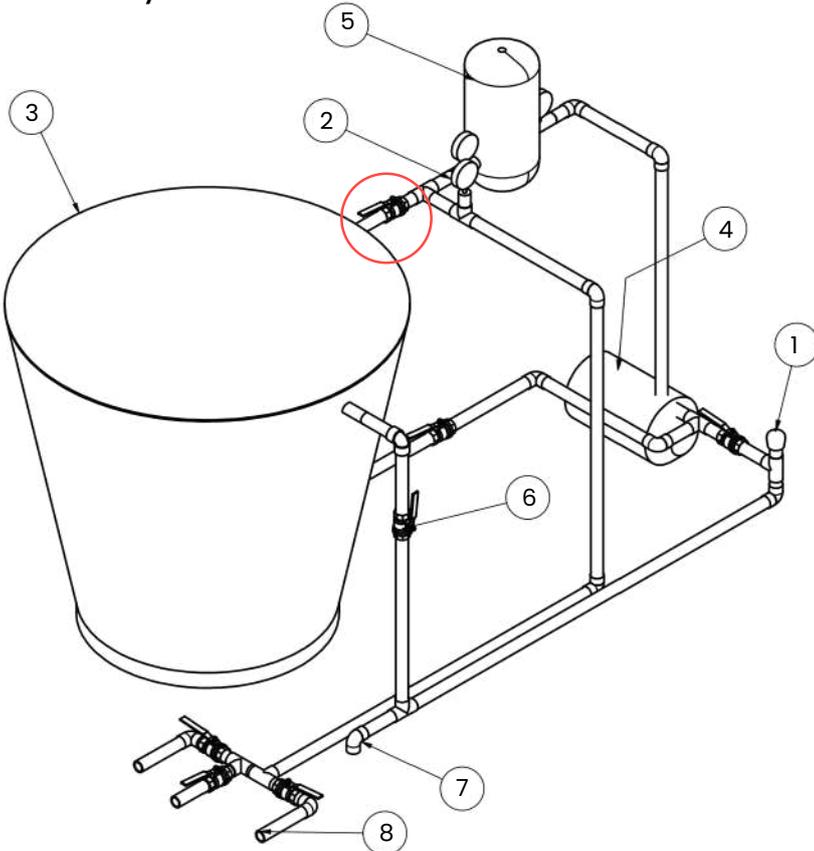
Figura 4. Plano de distribución de tuberías primarias, secundarias y cintas de goteo en campo abierto destinado a la siembra de lechuga para la implementación del riego por goteo en la Ciudad de los Niños, Cartago. Elaboración propia en el programa AutoCAD, versión 2025.



Planos - Cabezal de riego

La Figura 5 ilustra el cabezal de riego, compuesto por una bomba hidráulica de 1 hp, un filtro de anillos y un tanque de 500 L para la fertirrigación de la lechuga hidropónica.

Debido a que la bomba es más potente que el sistema de riego, se requiere un retorno de agua al tanque durante la operación. Este se controla con la llave de paso (círculo rojo, Figura 5). Ajuste la llave hasta que las cintas de goteo estén firmes, pero sin exceso de rigidez que pueda causar daños. Otra forma de verificar la presión es observar el manómetro, ubicado después del filtro, y asegurarse de que marque entre 12 y 13 mca.



LISTA DE ELEMENTOS		
ELEMENTO	CTDAD	COMPONENTE
1	1	Válvula de aire
2	3	Manómetro
3	1	Tanque
4	1	Bomba hidráulica
5	1	Filtro de anillos
6	7	Llave de bola
7	1	Toma de agua
8	1	Salida de agua

Figura 5. Esquema del cabezal de riego del sistema de riego por goteo ubicado en la Ciudad de los Niños, Cartago, Costa Rica. Elaboración propia en Inventor, versión 2025.

Nota: El retorno de agua al tanque solo debe activarse cuando el tanque no esté siendo utilizado para la fertilización proporcional del sistema hidropónico. Si se está fertirrigando, es necesario instalar una válvula reguladora de presión. De lo contrario, el ingreso de agua al tanque durante este proceso alteraría la concentración de la solución nutritiva, comprometiendo el desarrollo del cultivo.



Sistema de inyección Venturi

La Figura 6 muestra el sistema Venturi, un componente clave para la fertirrigación de los cultivos, siguiendo los planes de fertilización establecidos más adelante.

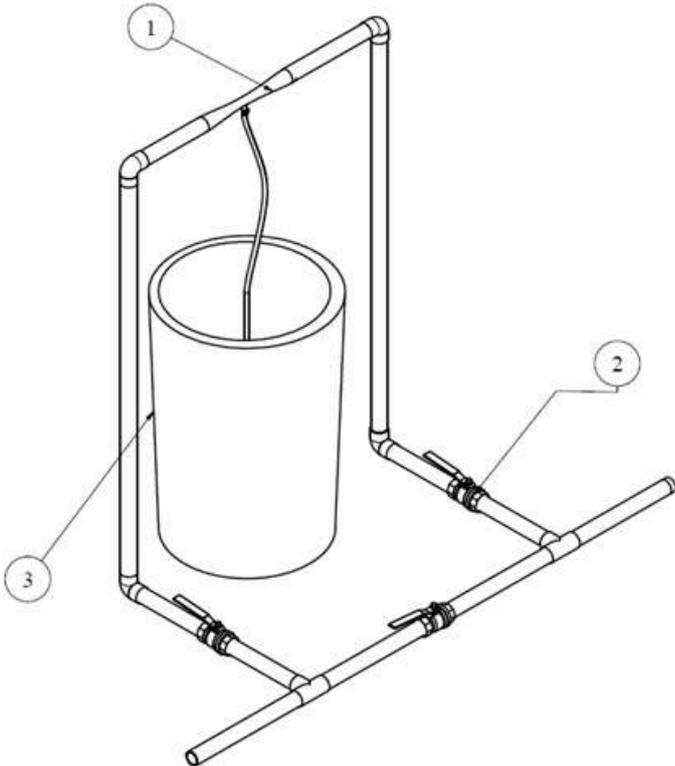
Para preparar la mezcla, disuelva los fertilizantes en el balde correspondiente para ello.

Antes de iniciar el fertirriego, es recomendable mantener el riego activo durante 1 a 2 minutos. Esto ayuda a estabilizar el sistema.

Para activar el sistema Venturi y aplicar los fertilizantes:

1. Cierre la llave de la tubería principal de riego que se observa en la figura 5.
2. Abra las dos llaves ubicadas a los costados del sistema Venturi.

Una vez finalizada la aplicación del fertirriego (cuando el balde esté vacío o la cantidad deseada se haya inyectado), ajuste las llaves de paso a su posición inicial (la llave principal abierta y las dos llaves del Venturi cerradas) para reanudar el riego normal.



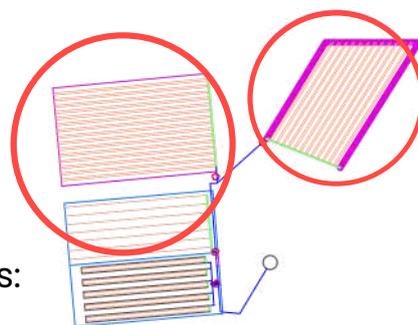
LISTA DE COMPONENTES		
ELEMENTO	CTDAD	COMPONENTE
1	1	Venturi
2	3	Llave de bola
3	1	Balde

Figura 6. Esquema del sistema de inyección Venturi ubicado dentro del ambiente protegido en la Ciudad de los Niños, Cartago, Costa Rica. Elaboración propia en Inventor.



Planes de fertirriego

Fertilización no proporcional con el Venturi (tomate en ambiente protegido, cebolla y lechuga en campo abierto)

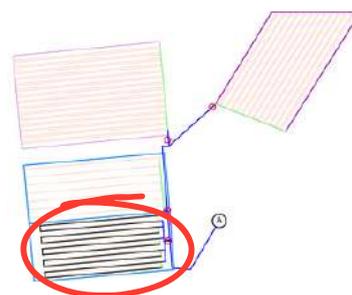


Para preparar la mezcla y aplicar los fertilizantes:

1. Agregue en el balde las cantidades de cada fertilizante que se indique en los planes de fertirriego según el cultivo.
2. Disuelva los fertilizantes en el balde con un mínimo de 5 litros de agua y asegúrese de mezclar hasta disolver todas las partículas sólidas.
3. Siga los pasos de la página anterior para realizar la aplicación del fertirriego.

La fertilización de estos lotes, la debe realizar en los días después de trasplante que se indican en los planes de fertirriego para los cultivos de tomate, cebolla y lechuga correspondientes a las tablas 2, 3, 4 y 5.

Fertilización proporcional (Lechuga hidropónica)



Para preparar la mezcla y aplicar los fertilizantes:

1. Agregue en el tanque de 500 L que se ubica en el cabezal de riego las cantidades de cada fertilizante que se indique en el plan de fertirriego de la lechuga hidropónica (Tabla 6).
2. Disuelva los fertilizantes en el tanque con la capacidad máxima de agua de este y asegúrese de mezclar hasta disolver todas las partículas sólidas.
3. Dado que la lechuga hidropónica requiere fertilización en cada aplicación de riego, es fundamental que el agua utilizada para regar provenga siempre del tanque de 500 litros con la solución nutritiva ya preparada.
4. Una vez se haya consumido el agua del tanque, realice nuevamente la solución nutritiva hasta culminar el ciclo de la lechuga.



Planes de fertirriego

Tomate en ambiente protegido

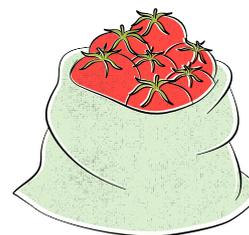
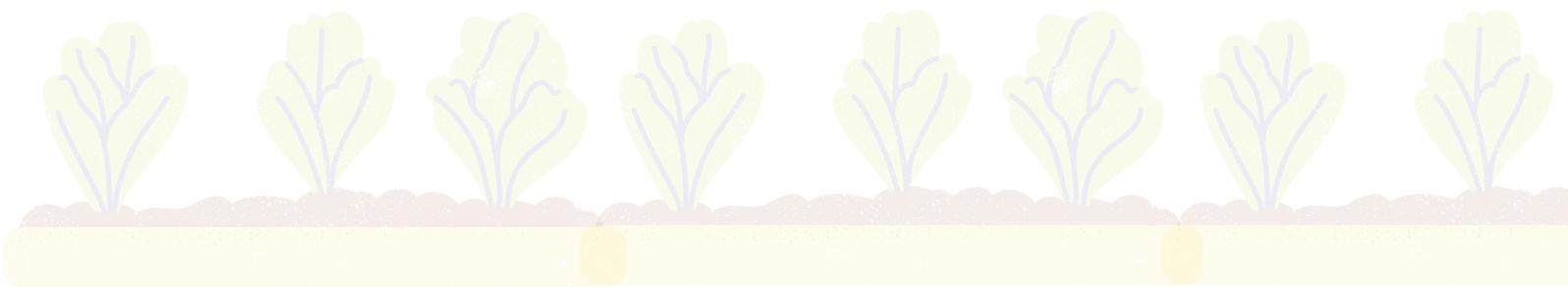


Tabla 2. Plan de fertilización no proporcional para el cultivo de tomate.

Fertilizante	Días después de trasplante											
	3	10	17	24	31	38	45	52	60	67	74	81
	kg/240 m2											
Nitrato de amonio	0,48	0,48	0,72	0,96	0,96	0,84	0,72	72,0	0,36	0,36	0,36	0,36
MAP	0,24	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,36	0,36	0,36	0,36
Nitrato de potasio	-	0,24	0,12	0,24	0,24	0,24	0,36	0,36	0,36	0,48	0,48	0,48
Sulfato de potasio	-	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,36	0,48	0,48	0,48
Nitrato de calcio	-	-	0,12	0,12	0,24	0,24	0,24	0,36	0,36	0,36	0,48	0,48
Sulfato de Magnesio	0,12	0,12	0,12	0,12	0,24	0,24	0,24	0,24	0,36	0,36	0,36	0,36
Sulfato de Zinc	-	-	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Ácido Bórico	-	-	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00



Planes de fertirriego

Tomate en ambiente protegido

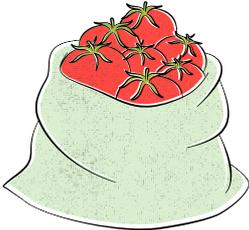


Tabla 3. Continuación del plan de fertilización no proporcional para el cultivo de tomate.

Fertilizante	Días después de trasplante											
	88	95	102	109	116	123	130	137	144	151	158	165
	kg/240 m2											
Nitrato de amonio	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	-
MAP	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Nitrato de potasio	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Sulfato de potasio	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	-
Nitrato de calcio	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Sulfato de Magnesio	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	-
Sulfato de Zinc	0,1	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ácido Bórico	0,1	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Planes de fertirriego

Lechuga a Campo abierto



Tabla 4. Plan de fertilización no proporcional para el cultivo de lechuga.

Fertilizante	Días después de trasplante							
	3	7	10	14	17	21	24	28
	kg/270 m2							
Nitrato de amonio	0,36	0,36	0,36	1,60	1,60	0,36	0,36	0,36
MAP	0,12	0,12	0,37	0,37	0,37	0,12	0,12	0,12
Sulfato de potasio	0,53	0,53	0,53	1,58	1,58	0,53	0,53	0,53
Nitrato de calcio	0,36	0,36	0,36	1,09	1,09	0,36	0,36	0,36
Sulfato de Magnesio	0,41	0,41	0,41	1,23	1,23	1,24	0,41	0,41
Sulfato de Zinc	-	-	-	0,01	0,01	-	-	-
Ácido Bórico	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01



Planes de fertirriego

Cebolla en campo abierto

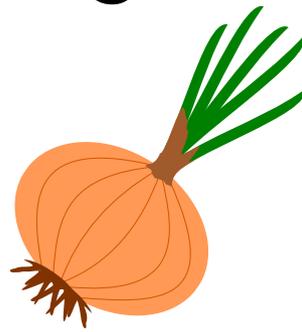
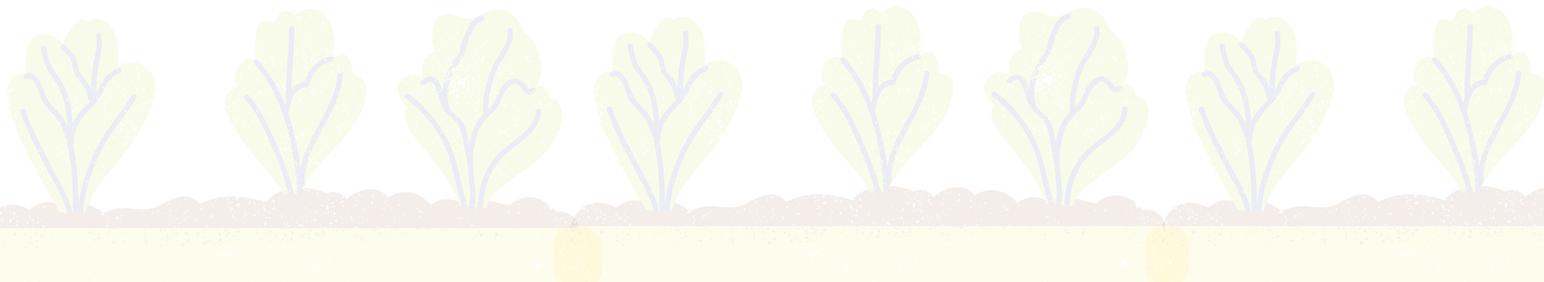


Tabla 5. Plan de fertilización no proporcional para el cultivo de cebolla.

Fertilizante	Días después de trasplante												
	3	10	17	24	31	38	45	52	60	67	74	81	91
	kg/400 m ²												
Nitrato de amonio	0,2	1,0	2,0	2,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4
MAP	-	0,6	1,2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	-	-
Nitrato de potasio	-	-	-	0,4	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	-
KCL	-	0,4	0,8	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	-	-	-	-
Sulfato de potasio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6	0,6	0,6	0,6
Nitrato de calcio	-	0,2	0,2	-	0,2	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Sulfato de Magnesio	-	0,2	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4
Sulfato de Zinc	-	-	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	-	-	-
Ácido Bórico	-	-	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	-	-	-



Planes de fertirriego



Lechuga hidropónica en ambiente protegido

Tabla 6. Plan de fertilización proporcional para el cultivo de lechuga hidropónica.

Fuentes de fertilizante	Cantidad de fertilizante para 500 litros (g)
Nitrato de calcio	50,0
Sulfato de Magnesio	25,0
Nitrato de potasio	4,6
Fosfato Monopotásico	6,8
Sulfato de Potasio	23,0
Quelato de hierro	1,5
Sulfato de Manganeso	95,0
Ácido Bórico en polvo	126,0
Sulfato de zinc	15,0
Sulfato de cobre	4,0
Molibdato de Sodio	1,0



Recomendaciones

- Considerando que la operación del sitio recae en estudiantes con disponibilidad limitada para una supervisión constante de los cultivos, se recomienda la automatización del riego en cada uno de los cuatro sectores de cultivo mediante la instalación de electroválvulas. Esta medida aseguraría la correcta y oportuna aplicación del riego.
- Como medida alternativa para gestionar la presión excedente suministrada por la bomba, se recomienda la instalación de una válvula reductora de presión de 1 pulgada en la tubería principal, inmediatamente aguas abajo del cabezal de control.
- Para la instalación del sistema de riego en el sistema hidropónico, se deben colocar dos cintas de goteo por bancal.
- Es importante mantener supervisión constante de un adulto durante el uso de los fertilizantes tanto en hidroponía como en el sistema de inyección Venturi.
- Los futuros planes de fertilización para el sistema de fertirriego, debidos a cambios del tipo de cultivo, deberán ser avalados por un ingeniero agrónomo.

