



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS – INGENIERIA INDUSTRIAL

RIEGO SOLAR EN AGRICULTURA FAMILIAR: CASO DE ESTUDIO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS – INGENIERIA
INDUSTRIAL

PRESENTA:

SELENI LUCIA LARA JAUREGUI

TUTORA

M.I. FRANCISCA IRENE SOLER ANGUIANO
FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM

MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dra. Flores De La Mota Idalia
Secretario: Dr. García Martínez Mariano Antonio
1 er. Vocal: M. I. Soler Anguiano Francisca Irene
2 do. Vocal: M.I. Figueroa Palacios José Domingo
3 er. Vocal: Dr. Del Moral Dávila Manuel

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: **FACULTAD DE INGENIERÍA
UNAM**

TUTOR DE TESIS:

M.I. FRANCISCA IRENE SOLER ANGUIANO

FIRMA

DEDICATORIA

A mi compañero de vida Daniel,

Tú has sido mi mayor apoyo a lo largo de este arduo camino. Tus palabras de aliento y tu amor incondicional me han dado la fuerza para superar cada obstáculo. Esta tesis no solo es el resultado de mi esfuerzo, sino también de nuestra colaboración y tu paciencia interminable. Cada página escrita lleva impresas las huellas de tu apoyo, y cada logro alcanzado es nuestro.

A mi querida familia,

A mis padres Sara y Martín, por ser mi inspiración y por haberme inculcado la pasión por el aprendizaje y el esfuerzo constante. Su sacrificio y dedicación han sido mi motor para alcanzar este logro. A mi hermano Kevin, por ser por ser mi respaldo y mi aliado en todas las etapas de mi vida. Y a mi abuelita Sara cuyo legado de perseverancia me impulsa a seguir adelante. Este trabajo está escrito con sus valores y enseñanzas que me brindaron.

A mi precioso Murphy,

Aunque quizás no entiendas el significado completo de esta tesis, quiero que sepas que has sido parte integral de cada página escrita y cada descubrimiento logrado.

AGRADECIMIENTOS

A mi querida maestra Francis, por elegirme, por su orientación, cuidado y su apoyo constante desde que pisé tierras mexicanas. Sus valiosos comentarios y sugerencias han enriquecido significativamente este trabajo y han sido una fuente inestimable de aprendizaje.

A mis queridos profesores, Dra. Idalia Flores, M.I. Carmen García, Dra. Oroselia Sánchez y Dr. Manuel Del Moral; cuyos conocimientos y pasión por la enseñanza han dejado una marca profunda en mi desarrollo académico, profesional y personal. Sus enseñanzas han guiado mis pasos y han ampliado mi comprensión en mi crecimiento profesional.

A mis amigos de la maestría Adrielly R. y Johans L., hermanos académicos con quienes compartí risas y frustraciones, celebrando cada éxito y brindándome consuelo en los momentos difíciles.

A las familias de agricultores peruanos, con quienes se trabajó de la mano y estar dispuestos a probar ideas innovadoras para sus cultivos.

A los miembros del jurado por su contribución en este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme un nuevo mundo de oportunidades y conocimiento durante mi proceso de investigación y aprendizaje.

A la CONAHCYT por que proporcionó el soporte económico para finalizar mis estudios de posgrado y llevar a cabo esta investigación de manera efectiva.

Contenido

| | |
|--|-----|
| DEDICATORIA..... | iii |
| AGRADECIMIENTOS | iv |
| 1 Definición del proyecto..... | 1 |
| 1.1 Introducción..... | 1 |
| 1.2 Objetivos y alcance..... | 2 |
| 2 Antecedentes | 3 |
| 2.1 El papel de la agricultura en los usos futuros del agua..... | 4 |
| 2.1.1. Gestión sostenible del agua en la agricultura | 4 |
| 2.1.2. Huella hídrica en la agricultura..... | 5 |
| 2.1.3. Eficiencia de riego | 7 |
| 2.2 Sistemas de riego..... | 8 |
| 2.2.1. Riego tecnificado o tradicionales | 8 |
| 2.2.1. Riego no tecnificado o no tradicionales | 11 |
| 2.3 Agricultura y riego sustentable..... | 12 |
| 2.3.1. Reciclaje de plásticos para uso agrícola..... | 14 |
| 3 Situación actual de agricultura en Perú..... | 16 |
| 3.1 Importancia de la agricultura familiar | 17 |
| 3.2 La brecha en la agricultura peruana | 19 |
| 3.2.1. Sistemas de riego tecnificado en el Perú:..... | 19 |
| 3.2.2. Iniciativas para reducir la brecha:..... | 21 |
| 4 Marco teórico | 22 |
| 4.1 Diseño de experimento..... | 22 |
| 4.2 Teoría de redes..... | 23 |
| 4.2.1. Conceptos básicos..... | 24 |
| 4.2.2. Teoría de grafos - arborescencia | 24 |
| 4.2.3. Diseño de redes de riegos..... | 27 |
| 4.3 Dinámica de sistemas..... | 28 |

| | | |
|--------|---|----|
| 5 | Metodología..... | 31 |
| 6 | Caso de estudio | 32 |
| 6.1 | Elección del cultivo y posibles sistemas de riego..... | 32 |
| 6.2 | Planificar y efectuar diseño de experimento..... | 33 |
| 6.2.1. | Eficiencia de campana de 3L vs. 7L | 36 |
| 6.2.2. | Diseño de experimento bloqueado para campanas 7L | 38 |
| 6.2.1. | Comparaciones por parejas de Fisher..... | 42 |
| 6.3 | Evaluación de resultados y análisis del sistema | 43 |
| 6.3.1. | Consumo hídrico..... | 43 |
| 6.3.2. | Altura del cultivo | 44 |
| 6.3.3. | Rendimiento del cultivo | 45 |
| 6.4 | Eficiencia de riego con enfoque de dinámica de sistemas | 47 |
| 6.4.1. | Diagrama de bucle causal..... | 47 |
| 6.4.2. | Modelo matemático..... | 47 |
| 6.4.3. | Diagrama de stock-flujo..... | 48 |
| 6.4.4. | Verificación del modelo | 48 |
| 6.4.5. | Validación del modelo | 49 |
| 6.4.6. | Aplicación del modelo de simulación..... | 51 |
| 6.4.7. | Datos del modelo..... | 51 |
| 6.4.8. | Resultados..... | 52 |
| 6.5 | Propuestas de mejora..... | 55 |
| 6.5.1. | Tecnificar el sistema de riego | 55 |
| 6.5.2. | Diseño y configuración de riego localizado | 56 |
| 7 | Conclusiones y discusiones | 59 |
| 8 | Referencias | 60 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1. Elementos de la huella hídrica..... | 6 |
| Tabla 2.2. Huella hídrica para diferentes cultivos | 6 |
| Tabla 2.3. Eficiencia de riego en agricultura de Latinoamérica..... | 7 |
| Tabla 2.4. Variantes de sistema de riego por superficie o gravedad | 9 |
| Tabla 2.5. Categoría de riego localizado..... | 10 |
| Tabla 2.6. Aspectos, ventajas y desventajas de los sistemas de riego..... | 10 |
| Tabla 2.7. Aplicaciones del plástico en la industria agrícola | 15 |
| Tabla 3.1. Aplicaciones del uso de plástico en agricultura familiar | 18 |
| Tabla 6.1. Temperaturas críticas para el pimiento..... | 33 |
| Tabla 6.2. Muestra de agua condensada cl/planta semanal | 37 |
| Tabla 6.3. Comparación de dos poblaciones (Campana de 3L y 7L)..... | 37 |
| Tabla 6.4. Información del factor | 39 |
| Tabla 6.5. Características del experimento DBCA | 40 |
| Tabla 6.6. ANOVA para planta de 35 días | 41 |
| Tabla 6.7. ANOVA para planta de 63 días | 42 |
| Tabla 6.8. ANOVA para planta de 84 días | 42 |
| Tabla 6.9. Comparaciones para consumo de agua cl/planta..... | 43 |
| Tabla 6.10. Consumo hídrico (cl) y ahorro (%)..... | 44 |
| Tabla 6.11. Altura de la planta (cm)..... | 45 |
| Tabla 6.12. Rendimiento del cultivo..... | 46 |
| Tabla 6.13. Parámetros programados para el modelo de riego..... | 49 |
| Tabla 6.14. Resultados de la validación del área y tiempo de simulación | 50 |
| Tabla 6.15. Datos de simulación para plantas pequeñas | 52 |
| Tabla 6.16. Clasificación de experimento para un sistema de riego eficiente..... | 54 |
| Tabla 6.17. Valores posibles para el cultivo entre 15 y 30 minutos de riego | 56 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1. Riego por surco | 8 |
| Figura 2.2. Riego por aspersión | 9 |
| Figura 2.3. Riego por goteo | 9 |
| Figura 2.4. Riego capilar con cordón..... | 11 |
| Figura 2.5. Riego por goteo con tornillos..... | 12 |
| Figura 2.6. Riego por riego solar | 12 |
| Figura 2.7. Ejemplos de uso de plásticos en la agricultura..... | 14 |
| Figura 3.1. Uso del agua para sectores del Perú..... | 16 |
| Figura 3.2. Sistemas de riego integrado..... | 21 |
| Figura 4.1. Ejemplo de una red (N, A)..... | 24 |
| Figura 4.2. Ejemplo de un árbol..... | 24 |
| Figura 4.3. Ejemplo de un bosque | 25 |
| Figura 4.4. Ejemplo de un árbol de expansión | 25 |
| Figura 4.5. Grafo no dirigido, árbol de expansión, árbol de expansión mínima..... | 26 |
| Figura 4.6. Etapas para diseñar e implementar red de riego | 27 |
| Figura 4.7. Diagrama de bucle causal de un modelo de riego simple..... | 28 |
| Figura 4.8. Diagrama stock-flujo del modelo de riego simple | 29 |
| Figura 5.1. Metodología..... | 31 |
| Figura 6.1. Sistema de riego solar propuesto..... | 33 |
| Figura 6.2. Ubicación de proyecto – San Ramón – La Merced – Perú | 35 |
| Figura 6.3. Modelo general del diseño de experimento | 35 |
| Figura 6.4. Sistema operativo de riego solar..... | 36 |
| Figura 6.5. Prueba de igualdad de varianza – Fisher F..... | 37 |
| Figura 6.6. Prueba de igualdad de media – T-student | 38 |
| Figura 6.7. Crecimiento y desarrollo del pimiento morrón en estadios..... | 40 |
| Figura 6.8. Consumo hídrico (cl)..... | 44 |
| Figura 6.9. Altura del cultivo (cm) | 45 |
| Figura 6.10. Rendimiento del cultivo (unidades)..... | 46 |
| Figura 6.11. Validación del modelo | 50 |
| Figura 6.12. Clasificación de resultados de simulación | 53 |
| Figura 6.13. Sistema de riego localizado propuesto | 56 |
| Figura 6.14. Grafo de arborescencia | 57 |
| Figura 6.15. Grafo de arborescencia de ruta más corta | 57 |
| Figura 6.16. Red de integración de riego..... | 58 |
| Figura 6.17. Grafo de árbol de árbol de expansión mínima..... | 58 |

Lista de Apéndice

| | |
|---|----|
| Apéndice 1. Diseño de experimento..... | 66 |
| Apéndice 2. Materiales y esquema operativo del proyecto..... | 70 |
| Apéndice 3. Prueba de independencia de la campana de 3L y 7L..... | 71 |
| Apéndice 4. Prueba de normalidad de la campana de 3L y 7L..... | 72 |
| Apéndice 5. Distribución del DBCA del pimiento morrón..... | 74 |
| Apéndice 6. Modelo: Consumo agua cl vs. N° Campanas, Parcela – 35 días..... | 75 |
| Apéndice 7. Modelo: Consumo agua cl vs. N° Campanas, Parcela – 63 días..... | 76 |
| Apéndice 8. Modelo: Consumo agua cl vs. N° Campanas, Parcela – 84 días..... | 77 |
| Apéndice 9. Comparaciones para consumo agua cl – 35 días..... | 78 |
| Apéndice 10. Comparaciones para consumo agua cl – 63 días..... | 79 |
| Apéndice 11. Comparaciones para consumo agua cl – 84 días..... | 80 |
| Apéndice 12. Datos de simulación para plantas grandes..... | 81 |
| Apéndice 13. Resultados de la simulación..... | 82 |

1 Definición del proyecto

1.1 Introducción

La agricultura es una actividad milenaria que ha moldeado la forma de vida de comunidades en todo el mundo. No solamente por su importancia en la seguridad alimentaria de la población, sino por su potencial para contribuir a un crecimiento más inclusivo y sostenible. La agricultura ha jugado un papel importante en el desarrollo económico y social de los países. Además, el sector agrícola abre oportunidades únicas en aspectos preocupantes como el uso eficiente de los recursos hídricos.

Entre 2012 y 2021, el sector agropecuario en la región andina ha presentado, en promedio, 12,6%, 9,2%, 6,2% y 5,7% del PIB de Bolivia, Ecuador, Colombia y Perú, respectivamente, y en la actualidad, representa 29,7%, 27,5%, 16,7% y 27,8% del total de los empleados formales [1]. Para Perú, el sector agrícola cumple un rol fundamental para el crecimiento económico y la reducción de la pobreza rural, que según datos oficiales del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) [2], la agricultura es fuente principal de ingresos de 2.3 millones de familia que representa el 34% de los hogares peruanos; donde el 80% son hogares rurales y 10,6% hogares urbanos.

En cuando a las notorias diferencias climáticas y geográficas de la mega diversidad del Perú; los agricultores se enfrentan a retos adicionales como cultivar en ecosistemas desafiantes [3] (desiertos, altas montañas y selvas tropicales) y el riesgo recurrente de heladas, sequías, inundaciones entre otros factores climáticos [4]. Sumado a ello, el uso indebido durante años de los recursos hídricos por parte del sector doméstico e industria, los efectos del cambio climático, una población en crecimiento y prácticas agrícolas inadecuadas han incrementado la escasez de agua y obstaculizado los esfuerzos hacia el desarrollo sostenible. Este último aspecto implica desigualdad en la distribución nacional del agua debido a la mala gestión y los deficientes sistemas de riegos implementados. Además, que, para un riego tecnificado, se requiere de una alta inversión para su implementación y de mano de obra especializada, generando así una mayor limitante para el agricultor [5].

Una posible solución a estos problemas es la implementación de sistemas de riego no tradicionales para zonas rurales, pues es una posible opción viable para contribuir al uso racional y eficiente del agua a un bajo costo de inversión y factible, teniendo en

cuenta que un sistema de riego bien diseñado es un requisito esencial para un riego amigable, rentable y ambiental.

Un sistema de riego no tradicional bajo estas características es el riego solar [6] [7] técnica que consiste en la destilación de agua empleando únicamente la energía solar a partir de la colocación de botellas de plásticos con agua a unos cuantos centímetros de la planta, reproduciendo el ciclo natural hidrológico en pequeña escala. Esta técnica puede ser fácilmente empleada en países con prolongadas estaciones de sequías e incluso en las zonas desérticas con poco acceso a fuentes de agua [8] [9]. Con la aplicación de esta técnica de riego, las plantas se desarrollan empleando exclusivamente la cantidad necesaria de agua evitando que se evapore aquella que no es aprovechada.

1.2 Objetivos y alcance

El objetivo general del proyecto es implementar un sistema de riego y evaluar su eficiencia de agua de un cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annum L.*) en un caso de estudio en La Merced – Perú de una agricultura familiar. Los objetivos específicos para su cumplimiento son:

- Diagnóstico de la problemática de los sistemas de riego en Perú.
- Análisis de la eficiencia de los sistemas de riego existentes.
- Diseño y evaluación de sistema de riego propuesto.
- Propuestas de mejora eficientes.

El alcance del presente proyecto es implementar un sistema de riego y proponer una solución para optimizar el consumo del agua en la agricultura familiar peruana tomando en cuenta la parte técnica y social. Mediante las metodologías de diseño de experimento, investigación de operaciones y dinámica de sistemas se tendrá un panorama más amplio de la problemática que ayudará a analizar la eficiencia de los sistemas de riego, así como el impacto de un buen diseño de red de riego. De esta manera se determinará los elementos esenciales para ahorro del agua, condiciones necesarias y desarrollo del cultivo a corto, mediano y largo plazo a fin de generar productividad para los agricultores y brindarles herramientas para mejores tomas de decisiones. Con estas metodologías, se busca tomar las mejores decisiones para garantizar optimizar el tipo de riego y la red de riego a utilizar maximizando la eficiencia del uso del agua en el cultivo de pimiento morrón para el agricultor peruano desde la parte individual hasta a colectiva.

2 Antecedentes

La agricultura es esencial para lograr la seguridad alimentaria y apoyar los medios de vida y las economías. Se requieren respuestas urgentes para mejorar la gestión del agua en la agricultura [10]. Según las Naciones Unidas [11], la gestión sostenible del agua es indispensable para el crecimiento resistente al clima y la integridad ambiental: “la gestión insostenible del agua tiene efectos devastadores para las personas, las economías y el medio ambiente”.

El agua se considera el recurso más crítico para el desarrollo sostenible en la mayoría de los países [12]. Es esencial no solo para la agricultura, la industria y el crecimiento económico, sino que también es el componente más importante del medio ambiente, con un impacto significativo en la salud y la conservación de la naturaleza. El aumento de la población, los patrones de producción y consumo insostenibles y el cambio climático son factores críticos para aumentar el estrés hídrico. Debido a los crecientes problemas de escasez de este recurso, el uso de la metodología "usar y desechar", ya no es sostenible ni con los recursos hídricos ni con ningún otro recurso natural [13]. Como resultado, se ha hecho evidente la necesidad de una política coherente de gestión racional de los recursos hídricos en todos sus niveles, ya sea a nivel doméstico, agrícola o industrial.

Además, la capacidad de mejorar la gestión del agua en la agricultura se ve limitada por políticas erradas, un desempeño institucional deficiente y restricciones financieras en donde las instituciones públicas y privadas más importantes entre ellas los ministerios de agricultura y agua, las autoridades encargadas de gestionar las cuencas hidrográficas, los administradores de los sistemas de riego, los usuarios de agua y las organizaciones de agricultores; por lo general no cuentan con entornos y capacidades normativas para realizar sus funciones con eficacia. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO [14], el acceso al agua para la agricultura es desigual en todo el mundo, y las comunidades pobres y marginadas a menudo tienen un acceso limitado al agua para la agricultura

Aumentar la eficiencia en el consumo de agua para fines agrícolas dependerá también de hacer coincidir los incentivos y las transferencias de tecnología para las inversiones dentro de las explotaciones agrícolas destinadas a mejorar la gestión del suelo y del agua. Así como la gestión de riego no tradicionales para las zonas rurales en donde la tecnificación es casi nula.

2.1 El papel de la agricultura en los usos futuros del agua

El uso del agua dentro de los sistemas agrícolas, principalmente el riego, representa casi el 70% de las extracciones de agua a nivel mundial [12]. Y se espera que estos montos aumenten en los próximos treinta años para respaldar el aumento esperado del 20% en la cantidad de tierra dedicada al riego. La eficiencia del uso del agua de riego es actualmente de alrededor del 35% en todo el mundo y se espera que mejore a un promedio del 42% para 2030 [15], utilizando tecnología y mejores prácticas de gestión del agua de riego.

Actualmente, la tierra irrigada representa aproximadamente una quinta parte del área cultivable total en los países en desarrollo, y en los países en vía de desarrollo representan aproximadamente el 75% de las áreas irrigadas del mundo [16]. Dada esta situación, se deben emprender numerosos cambios en las tendencias actuales del uso del agua para lograr un “escenario de agua sostenible”. Es evidente que se deben realizar inversiones en tecnología de riego y gestión del agua para lograr este escenario. La adopción de técnicas agrícolas avanzadas, la inversión en investigación de cultivos, el cambio tecnológico, la infraestructura rural y la reforma de la gestión del agua para impulsar la productividad del agua y el crecimiento de los rendimientos de los cultivos en la agricultura de secano (agua de lluvia) son componentes adicionales necesarios [17].

2.1.1. Gestión sostenible del agua en la agricultura

Una buena gestión del agua es fundamental para los procesos agrícolas. Para ahorrar agua en la agricultura, es necesario actuar en dos lados al mismo tiempo: reducir el consumo de agua y preservar los recursos [12]. Por este motivo, es necesario manejar el agua con la mayor eficiencia posible, optimizando los procesos productivos y controlando su consumo [18].

La gestión sostenible del agua en la agricultura tiene como objetivo igualar la disponibilidad y las necesidades de agua en cantidad y calidad, en espacio y tiempo, a un costo razonable y con un impacto ambiental aceptable. Su adopción involucra problemas tecnológicos, comportamiento social de las comunidades rurales, restricciones económicas, marco legal e institucional y prácticas agrícolas [19].

El riego no es sostenible si los suministros de agua no son fiables. Especialmente en áreas de escasez de agua, la principal necesidad para el desarrollo del riego es minimizar

el uso del agua. Es necesario esforzarse para encontrar cultivos económicos que utilicen un mínimo de agua [20], para utilizar métodos de aplicación que minimicen la pérdida de agua por evaporación del suelo o percolación de agua más allá de la profundidad de la zona de raíces y para minimizar las pérdidas de agua de los sistemas de almacenamiento o suministro. Hoy en día, durante un período de cambios dramáticos e incertidumbre sobre los recursos hídricos, existe la necesidad de brindar apoyo y aliento a los agricultores para que pasen de sus prácticas tradicionales de riego y cultivo de alta demanda de agua a sistemas y tecnologías modernos y de demanda reducida [21].

Por lo que existen distintas medidas que se puede llevar a cabo para conseguir un ahorro en el uso del agua en el sector agrícola [22] [23] [24]:

- Elegir el sistema de riego más eficiente para satisfacer las necesidades del cultivo. Los sistemas de riego por goteo o aspersión consumen menos agua que el riego de superficie y se pueden alcanzar los mismos rendimientos.
- Ajustar las dosis de riego a las necesidades del cultivo en cada momento.
- Elegir el momento más adecuado de realizar los riegos para evitar la evaporación del agua, para ello es preferible realizar los riegos durante las horas de menos calor, esto es, primera hora de la mañana o última hora de la tarde.
- Promover el reciclaje y la reutilización del agua mediante el aprovechamiento del agua de lluvia, para ello puede ser interesante la construcción de reservorios como estanques, pozos o reservas subterráneas que permitan incrementar la disponibilidad de agua.
- Usar de programas de simulaciones de sistemas de riego a fin de tomar mejores decisiones soportadas tanto por la estadística como los distintos escenarios del entorno.

2.1.2. Huella hídrica en la agricultura

La huella hídrica es un indicador de sostenibilidad que permite identificar relaciones causa – efecto a nivel socioambiental, siendo las actividades socioeconómicas el principal factor de presión sobre los recursos naturales [25]. La huella hídrica de cualquier bien o servicio es el volumen de agua utilizada directa o indirectamente para su producción, sumados los consumos de todas las etapas de la cadena productiva [26]. Los tres componentes básicos se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Elementos de la huella hídrica

| Huella hídrica | Descripción |
|----------------|---|
| Azul (HHA) | Es el volumen de agua dulce evaporada de los recursos globales de agua superficial y subterránea para producir los bienes y servicios consumidos por el individuo o la comunidad. |
| Verde (HHV) | Es el volumen de agua evaporada de los recursos globales de agua verde (agua de lluvia almacenada en el suelo). |
| Gris (HHG) | Es el volumen de agua contaminada, que puede ser cuantificada como el volumen de agua requerida para diluir los contaminantes hasta el punto en que la calidad del agua esté sobre los estándares aceptables. |

La mayor parte de la bibliografía disponible sobre la huella hídrica en la agricultura reporta solo los valores totales de huella hídrica y, como se aprecia en la Tabla 2.2, los datos se dan en un rango muy amplio para los diferentes productos obtenidos de varios cultivos y crianzas [27].

Tabla 2.2. Huella hídrica para diferentes cultivos

| Productos | Litros de agua / kilo de producto | Litros de agua / kilocalorías | Litros de agua / gramo de proteína |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Azúcar | 197 | 0,69 | - |
| Vegetales | 322 | 1,34 | 26 |
| Frutas | 962 | 2,09 | 180 |
| Leche | 1 020 | 1,82 | 31 |
| Huevos | 3 265 | 2,29 | 29 |
| Pollo | 4 325 | 3,00 | 34 |
| Carne de res | 15 425 | 10,19 | 112 |

Cuando la huella hídrica se expresa en litros de agua/kilocaloría y litros de agua/gramo de proteína, las cifras son variadas en función del aporte que el producto hace a estos componentes. Las frutas, aparentemente, requieren mucha agua por unidad de proteína, pero es porque el contenido de proteína en las frutas por unidad de peso es bajo [27] y esto es importante por el interés de la escasez o contaminación

del agua en el mundo, pero también puede permitir la mejora de la gestión de la producción de agua.

2.1.3. Eficiencia de riego

Los métodos de riego modernos son lo suficientemente eficientes como para suministrar agua a todo el campo de manera uniforme, de modo que cada planta tenga la cantidad de agua que necesita, ni demasiada ni muy poca. La eficiencia del uso del agua o productividad del agua en el campo [28] se puede determinar según la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia del agua} = \frac{\text{Producción (kg)}}{\text{Agua Utilizada (m}^3\text{)}} \quad (1)$$

La productividad del agua es un indicador importante en áreas con recurso hídricos esenciales y permite calcular el valor económico del agua de riego que puede ser maximizado.

La eficiencia de riego en la agricultura de Latinoamérica varía según los países y cultivos producidos, pero en general, existen importantes oportunidades para mejorarla y así reducir el uso de agua y mejorar la productividad agrícola. En la Tabla 2.3, se presenta algunas estadísticas y datos relevantes sobre la eficiencia de riego en la agricultura de Latinoamérica:

Tabla 2.3. Eficiencia de riego en agricultura de Latinoamérica

| País | Eficiencia de riego promedio | Entidad | |
|-----------|------------------------------|---|------|
| Argentina | 45% | Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA | [29] |
| Chile | 50% | Centro de Información de Recursos Nacionales – CIREN | [30] |
| México | 50% | Comisión Nacional del Agua – CONAGUA | [31] |
| Perú | 40% | Autoridad Nacional del Agua – ANA | [32] |
| Mundo | 40% - 50% | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO | [33] |

2.2 Sistemas de riego

En la agricultura, los sistemas de riego son utilizados para un aprovechamiento óptimo del agua. Dentro de las actividades agropecuarias, se requiere de un aprovechamiento óptimo de este líquido vital debido a su limitada disponibilidad en varias partes del mundo [34]. Un adecuado sistema de riego aporta la cantidad necesaria de agua en el momento que se necesita [35], humedeciendo el suelo hasta la profundidad que requiera el cultivo.

Existen diferentes sistemas de riego; las condiciones climatológicas, el alimento y las características del suelo definen el tipo de sistema [24]. En los tiempos antiguos, la agricultura se adaptaba a las diferentes estaciones del año, así se especificaba qué cultivar y los meses para su óptimo desarrollo, dependiendo la cantidad de lluvia que necesitaría el cultivo, sin embargo, estas parcelas se veían afectadas por la variación de la temporada de lluvia o alguna sequía.

2.2.1. Riego tecnificado o tradicionales

Los sistemas de riego son las instalaciones técnicas que se necesitan para la gestión de las tierras cultivables mediante el riego [36]. Según el tipo de riego se identifican los siguientes sistemas de riego: riego por superficie o por gravedad, riego por aspersión y riego localizado [37].



Figura 2.1. Riego por surco

Riego por superficie o gravedad: Es un método que engloba gran número de variantes o sistemas diferentes. Dentro de los más usados destacan el riego por surcos, el riego por tableros y el riego por fajas [38]. En la Tabla 2.4 se reconocen los siguientes sistemas de riego por superficie:

Tabla 2.4. Variantes de sistema de riego por superficie o gravedad

| Riego | Descripción |
|-------------------------------|---|
| Riego por surcos | Se infiltra el agua lentamente a través de los surcos o pequeños canales abiertos y equidistantes (ver Figura 2.1). Existen dos tipos: surcos con pendiente, cuyos surcos se distribuyen de manera paralela y surcos a nivel, cuyo trazado se hace dentro de un tablar. |
| Riego por tablares o canteros | Se aplica agua a sistemas de parcelas planas y rectangulares, por lo general, circundadas por diques o caballones que limitan el paso del agua a otras parcelas, quedando el agua estancada e infiltrándose paulatinamente en el suelo. |
| Riego por fajas | En este tipo de riego, el terreno se divide en franjas rectangulares estrechas, llamadas fajas o melgas, separadas unas de otras mediante caballones dispuestos longitudinalmente. El agua discurre a lo largo de las fajas formando una lámina delgada que se va infiltrando poco a poco al tiempo que avanza. |
| Riego por pozas | Es un sistema que funciona con pozas donde se almacena el agua de lluvia y queda a disposición de la planta, característico de zonas con pendiente y zonas arbóreas (como en olivares). |



Figura 2.2. Riego por aspersión

Riego por aspersión: El agua llega a la siembra por medio de tuberías y mediante pulverizadores llamados aspersores que humedecen el terreno de forma similar a como lo haría la lluvia (ver Figura 2.2). El objetivo es aplicar una lámina que sea capaz de infiltrarse en el suelo sin producir escurrimientos [39]. La uniformidad de riego debe cubrir el área en un 80% para que su uso sea eficiente.



Figura 2.3. Riego por goteo

Riego por localizado: Es un método que suministra agua a presión en forma de gotas que directamente acceden a la zona radicular de cada planta [40] (ver Figura 2.3). En la Tabla 2.5 se diferencian dos categorías diferentes de riego localizado:

Tabla 2.5. Categoría de riego localizado

| Riego | Descripción |
|-----------------|---|
| Riego por goteo | Se aplica el agua en la superficie del suelo a través de unos pequeños orificios o goteros. |
| Microaspersión | Se aplica el agua como en aspersión, pero las áreas regadas son pequeñas y localizadas. |

Encontrar una solución para las consecuencias que ocasiona la agricultura de regadío pasa por cambiar por completo la forma en que se utiliza y recolecta el agua. Para ello, es importante modernizar las técnicas de riego que se utilizan. Una forma de hacerlo es utilizando fuentes no tradicionales [41] como el agua desalada o utilizando sistemas de trasvase. Sin embargo, estas opciones tienen grandes implicaciones tanto a nivel medioambiental, como en el plano social y económico. Según Lazarova y Bahri (2018) [42] y Carrazón (2017) [43], los aspectos, ventajas y desventajas de los principales sistemas de riegos se detalla en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Aspectos, ventajas y desventajas de los sistemas de riego

| Riego | Riego por inundación | Riego por aspersión a alta presión | Riego por aspersión a baja presión | Riego por goteo (localizado) |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Costo de inversión | Bajo en terreno plano | Elevado | Elevado | Elevado |
| Necesidades energéticas | Bajo o nulo | Elevado | Mediano | Bajo |
| Nivel técnico necesario | Bajo | Mediano | Mediano | Elevado |
| Carga de trabajo | Elevado | Bajo | Mediano | Bajo |
| Eficiencia de riego | Bajo (40-50%) | Elevada (70-80%) | Medio (50-70%) | Elevado (90-95%) |
| Costo del riego (por hora de trabajo) | De bajo a mediano | Elevado | Mediano | Elevado |

Con el avance de las nuevas tecnologías, se ha desarrollado nuevas opciones cada vez más sofisticadas para el desarrollo de los sistemas de riego. En la agricultura se han desarrollado diversas técnicas de optimización de agua para usar tan solo el agua

necesaria y para que la producción agrícola sea lo más rentable posible. Debido a que invertir recursos humanos para realizar una tarea de riego cuando es posible automatizarlo no es rentable [44], y hay que tener en cuenta los aspectos sociales y ecológicos cuando se trata de evaluar los tipos de sistema de riego para crear un sistema que sea inclusivo y que respete tanto a la sociedad y a los colectivos como al ecosistema natural en el que se implanta.

2.2.1. Riego no tecnificado o no tradicionales

Los sistemas de riegos mencionados anteriormente se caracterizan por el uso de la tecnología, se clasifican como riego tecnificado [45]; que se refiere al aprovechamiento eficiente de los recursos acuíferos, a partir del uso adecuado de la tecnología en beneficio de la agricultura; está diseñado para saber cuándo, cuánto y cómo regar, permitiendo la aplicación en los cultivos de agua, fertilizantes y nutrientes de forma segura. Esta tecnificación del riego puede orientar a la disminución del consumo de agua, reducción de trabajo, facilidad de aplicación, aumento de producción por unidad o superficie y obtención de productos con mejor calidad [46].

Sin embargo, una de las desventajas principales es que la instalación del sistema es costosa, requiere de dispositivos especializados y mano calificada (*know-how*) [35]. Siendo indispensable el mantenimiento periódico y en el caso del sistema de riego por goteo, una vez instalado, no se puede volver a labrar el terreno [32]. Por ello, se presenta nuevas alternativas de riego con la finalidad de hacer un uso más sostenible, eficaz y eficiente del agua; dirigido a sobre pequeños agricultores que no tienen economía de escala en sus producciones agrícolas (agricultura familiar) [35]. Dichos sistemas son se presentan a continuación:



Figura 2.4. Riego capilar con cordón

Riego capilar con cordón: Funcionan para tener un riego constante y sin derrochar agua en un huerto o parcela, se puede usar el sistema de riego capilar por un cordón o hilo (ver Figura 2.4). Ante la escasez de agua, las plantas absorben solo el agua que necesita de la garrafa [47].



Figura 2.5. Riego por goteo con tornillos

Riego por goteo con tornillos: Consiste en rellenar una botella con agua, cerrar con un tapón y aplicar un pequeño orificio con la ayuda de una aguja [48]. La botella se coloca directamente boca abajo sobre la tierra de la planta, o bien colgando del revés encima de ella (ver Figura 2.5). Dependiendo del tamaño del orificio las botellas se vaciarían a mayor o menor velocidad.



Figura 2.6. Riego por riego solar

Riego por riego solar: Técnica de riego doméstica que trata de aprovechar la evaporación que ocurre en un recinto cerrado por una cubierta plástica transparente, dentro de la cual se produce una subida de la temperatura debido al efecto invernadero (ver Figura 2.6), para regar mediante evaporación y condensación que se produce dentro de la cubierta plástica [8].

Riego solar: El riego por condensación solar, riego solar o también conocido con el nombre de Kondenskompressor [7], es una técnica de riego que permite lograr un aprovechamiento óptimo del agua empleando la energía del sol como elemento motor del proceso del destilado y movimiento del agua [49]. Se trata de un sistema simple y eficaz mediante el cual es posible reducir la cantidad de agua de riego en hasta 5 veces con respecto a los sistemas tradicionales de riego [50].

De las técnicas alternativas presentadas, el sistema de riego por condensación solar es el método de irrigación utilizado en zonas áridas o de sequías en donde permiten la utilización óptima de agua, distribuyéndola así en forma controlada con una zona de humedecimiento radicular [51]. Esta distribución del agua se transporta a través de una condensación realizada con ayuda de las horas luz que se presenta en el día ya que esto permite que se realice la correcta evaporación del líquido vital [49].

2.3 Agricultura y riego sustentable

La agricultura y el riego sostenible son dos aspectos interrelacionados que son fundamentales para garantizar la seguridad alimentaria, proteger los recursos naturales y fomentar el desarrollo rural sostenible [12]. La agricultura sostenible implica utilizar prácticas agrícolas que sean rentables, socialmente equitativas y ambientalmente responsables [11]. El riego sostenible, por otro lado, se centra en gestionar el agua de

manera eficiente y sostenible para mejorar la productividad agrícola y reducir los impactos ambientales [52].

Se conoce como agricultura sustentable a la actividad agrícola basada en un sistema de producción productiva y rentable que genera desarrollo en las comunidades que la practican [53]. Se entiende por agricultura sustentable aquella que, en el largo plazo, contribuye a mejorar la calidad ambiental, satisface las necesidades básicas de fibra y alimentos humanos, es económicamente viable y mejora la calidad de vida del productor y la sociedad.

Según el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (2022) [54], la actual trayectoria de crecimiento de la producción agrícola es insostenible, debido a sus impactos negativos sobre los recursos naturales y el medio ambiente. Una tercera parte de la tierra agrícola está degradada, hasta el 75% de la diversidad genética de los cultivos se ha perdido.

Algunas prácticas y tecnologías que pueden ayudar a promover la agricultura y el riego sostenible son las siguientes [55]:

- La gestión del agua mediante sistemas de riego eficientes, como la micro irrigación o el riego por goteo, que reducen la cantidad de agua necesaria para producir cultivos.
- La agricultura de conservación, que implica técnicas para proteger el suelo y reducir la erosión, como la rotación de cultivos, el uso de abonos orgánicos y la siembra directa.
- La agroforestería, que combina la producción de cultivos con la gestión de árboles y bosques para mejorar la calidad del suelo y la biodiversidad.
- La diversificación de cultivos, que implica cultivar una variedad de plantas en un mismo terreno para reducir los riesgos de plagas y enfermedades, mejorar la calidad del suelo y aumentar la resiliencia del sistema agrícola.

La promoción de la agricultura y el riego sostenible es fundamental para garantizar la seguridad alimentaria, la protección de los recursos naturales y el desarrollo rural sostenible en todo el mundo. La adopción de prácticas agrícolas sostenibles y eficientes en el uso del agua puede ayudar a los agricultores a producir más alimentos con menos recursos, al mismo tiempo que protege los recursos naturales y reduce los impactos ambientales.

2.3.1. Reciclaje de plásticos para uso agrícola

La plasticultura, según Ortega M. de Plastics Technology México [56] se conoce al conjunto de productos plásticos empleados para asegurar la producción agrícola, mejora la cantidad y calidad de las cosechas al permitir una menor utilización de agua de riego, pesticidas y fertilizantes. Así, los plásticos en invernaderos túneles, geomembranas, redes, sistemas de riego y aplicaciones similares reducen la huella ecológica en la producción agrícola y ayudan a su circularidad (ver Figura 2.7). Una vez recolectados, los desechos plásticos de la agricultura se pueden reciclar.



Frente a las grandes cantidades de residuos plásticos, las prácticas comunes de disposición realizadas por los agricultores han consistido en enterrarlos con lo cual se compromete la calidad de los mantos acuíferos, o bien quemarlos a cielo abierto con la consecuente emisión de altos niveles de gases contaminantes.



Figura 2.7. Ejemplos de uso de plásticos en la agricultura

Por lo que el reciclado de plásticos agrícolas se presenta como una técnica de bajo impacto ambiental ya que no produce sustancias tóxicas que se pueden generar durante otros métodos de disposición como la incineración, además de presentar ventajas desde el punto de vista técnico y económico.

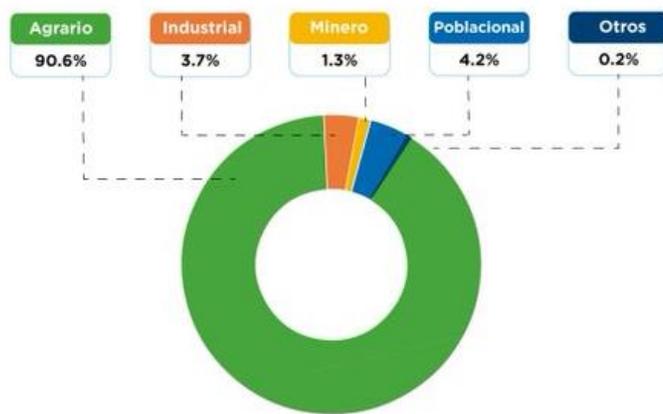
Las aplicaciones más frecuentes del plástico en la industria agrícola [57] se detallan en la Tabla 2.7 que se presenta a continuación:

Tabla 2.7. Aplicaciones del plástico en la industria agrícola

| Aplicación | Descripción |
|---------------------------------------|--|
| Invernaderos | <p>La capacidad que tiene el plástico para ayudar al agricultor a generar microclimas. Cada cultivo necesita distintas variables para mantenerse produciendo de manera eficiente y segura. Los invernaderos son estructuras que generan un lugar cerrado con una exposición solar controlada de las plantas, adaptándose a las necesidades requeridas para lograr condiciones ideales siempre, o incluso de crearlas. Así, el plástico protege los cultivos, de amenazas externas como plagas o temperaturas extremas y otros factores, acelerando finalmente también los procesos de cultivo y cosecha.</p> |
| Mini túneles | <p>Son invernaderos, pero más sencillos y pequeños, que cubren por lo regular sectores de la producción que queremos mejorar o proteger. Estas estructuras ayudan a fortalecer el microclima deseado, incrementando la temperatura y humedad de los cultivos.</p> |
| Acolchado | <p>Es necesario que el suelo tenga la menor erosión posible y cuidemos otras variables para su cuidado y producción óptimas. Ayuda mucho el generar un acolchado o mulch, una capa de residuos plásticos (que no contaminen el cultivo ni sean nocivos con el medio ambiente), o también de materiales orgánicos, que ayuden también a mantener la estructura del suelo, condición de vital importancia para un cultivo exitoso. El acolchado también ayuda a mantener raíces saludables de cultivos, así como evitar el crecimiento de maleza y otros factores que amenazarían el cultivo.</p> |
| Sistemas de riego y depósitos de agua | <p>El administrar agua a los cultivos debe ser una labor constante y adecuada a las necesidades de la que se requiera cosecha. El plástico ayuda a una correcta gestión del gasto de agua, reduciendo costos siempre de la mejor manera. El plástico ayuda en forma de depósitos que contienen el agua necesaria para los cultivos y la administran eficazmente a través de sistemas de riego. Una correcta ingeniería en la gestión de los recursos de estos sistemas es vital para desarrollar puntos en mejora de cultivos, tanto a gran escala, como los que queremos desarrollar en casa.</p> |

3 Situación actual de agricultura en Perú

Según, la autoridad Nacional del Agua (2021) [58] y el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego – MIDARI (2017) [59] en la distribución de la demanda de agua por sectores, el Perú cuenta con un 90,6% para el sector agrario, 3,7% sector industria, 1,3% minero y 4,2% para la población (ver Figura 3.1).



En los últimos años se han realizado grandes esfuerzos económicos para dotar a las comunidades de regantes (conjunto de parcelas que comparten infraestructuras para el uso colectivo del agua de riego) con instalaciones hidráulicas eficientes.

Figura 3.1. Uso del agua para sectores del Perú

Además, se han introducido nuevas tecnologías como el riego localizado o a presión, lo cual ha contribuido a incrementar la eficiencia en el uso del agua a nivel de parcela ya que se ha conseguido reducir el componente de evaporación de la evapotranspiración [60](evaporación del agua interceptada por la vegetación) del cultivo.

En los últimos años se han realizado grandes esfuerzos económicos para dotar a las comunidades de regantes (conjunto de parcelas que comparten infraestructuras para el uso colectivo del agua de riego) con instalaciones hidráulicas eficientes [32]. Además, se han introducido nuevas tecnologías como el riego localizado o a presión, lo cual ha contribuido a incrementar la eficiencia en el uso del agua a nivel de parcela ya que se ha conseguido reducir el componente de evaporación de la evapotranspiración (evaporación del agua interceptada por la vegetación) del cultivo.

Eficiencia de riego en Perú: Aproximadamente el 90% de la extracción de agua en el Perú se utiliza para el riego; sin embargo, la mayor parte del agua (65%) se pierde debido a la dependencia de sistemas de riego ineficientes [13]. Se estima que la eficiencia total del uso del agua en los sistemas de riego es aproximadamente del 35%, lo cual se considera como un mal rendimiento y se debe principalmente a los sistemas de

distribución con fugas y al uso extensivo de métodos de riego por gravedad o inundación no mejorados, con una eficiencia total estimada del 50% [61].

Por otro lado, y según el Plan Nacional de Recursos Hídricos, la eficiencia del agua de riego es apenas del 40% (ver Tabla 2.3), es decir, existe un alto desperdicio de agua, debido, entre varias razones, a su deficiente aplicación a los predios y el mal estado de conservación de las redes de conducción y distribución. Más aún, solo el 12% de los cultivos se riegan bajo sistemas de riego, mientras que el resto usa el riego por gravedad [62].

Infraestructura de riego: En la actualidad, el 64 % de la superficie agrícola de Perú carece de infraestructura de riego y sus cultivos solo dependen de la precipitación pluvial [63]. En la actualidad, el riego localizado se está volviendo cada vez más popular por su máxima eficacia [45], sobre todo en los países en vías de desarrollo, ya que se aplica el agua solamente donde es necesaria y en la cantidad en que la planta lo necesita siendo las pérdidas pequeñas. Una de las razones de los bajos rendimientos y pobre calidad de los productos agrícolas que se obtienen en la agricultura del país, especialmente en la costa peruana, se debe a que, en el proceso productivo del agro, se utilizan tecnologías tradicionales y deficientes, entre ellas, sistemas de riego tradicionales por gravedad e inundación. Por su parte, en zonas rurales y altoandinas, se encuentra la agricultura familiar como principal actividad económica en donde también se ve afectada por deficientes sistemas de riegos.

3.1 Importancia de la agricultura familiar

En el Perú, la agricultura familiar representa el 97% del total de las unidades agropecuarias del total de 2.2 millones de unidades agropecuarias [64] y cumple un papel clave en la lucha por la erradicación del hambre y la pobreza, en la seguridad alimentaria y la nutrición de la población, así como para mejorar las condiciones de vida, la gestión de los recursos naturales, la protección del medio ambiente y lograr el desarrollo sostenible, en particular en las zonas rurales [65].

Cabe resaltar que la agricultura familiar incluye todas las actividades agrícolas de base familiar y se relaciona con varios ámbitos del desarrollo rural. La agricultura familiar es una forma de clasificar la producción agrícola, forestal, pesquera, pastoril y acuícola gestionada y operada por una familia y que depende principalmente de la mano de obra familiar, incluyendo tanto a mujeres como a hombres [66].

Tanto en países en desarrollo como en países desarrollados, la agricultura familiar es la forma predominante de agricultura en la producción de alimentos. La Política Nacional Agraria [62] busca la aplicación de fundamentos agroecológicos en la producción agrícola, la innovación agrícola y la tecnología como herramientas esenciales que contribuyan con el incremento de la productividad de los agricultores.

Aplicaciones del uso de plástico en agricultura familiar: A continuación, en la Tabla 3.1 se presenta los distintos sistemas de riego implementados en agricultura familiar utilizando el plástico; debido a que se observó que el plástico funciona en la agricultura para: controlar temperaturas, regular exposición solar, optimizar resultados, reducir costos y proteger cultivo.

Tabla 3.1. Aplicaciones del uso de plástico en agricultura familiar

| Aplicaciones | |
|---|------|
| Según Programa de Agricultura Sostenible en Laderas de América Central (2018) de Nicaragua implementó un sistema de riego que consistía en utilizar botellas, galones o cualquier tipo de envases desechables para suministrar el agua por gotas a la superficie que se iba a regar. La instalación del sistema fue sencilla ya que sólo se requirió de practicar un corte en la parte ancha de la botella y abrir un agujero en el tapón, la instalación también fue sencilla. Se tenía que amarrar el envase al tronco de la planta, se podía colgar en las ramas o colocarla en un gancho que se clavaba a la orilla de la planta que se va a suministrar agua. El objetivo fundamental al que apunta esta tecnología era hacer llegar el agua de forma más eficiente al pie de la planta, en época de verano o cuando se retira el invierno por períodos prolongados. | [67] |
| El Instituto Nacional de Tecnologías Agropecuarias de Argentina (2015), mediante su Plan Nacional de Seguridad Alimentaria desarrolló un sistema de riego por goteo con botellas de plástico, esta técnica posibilitaba usar en forma eficiente el agua y aumentar el volumen y la calidad de la cosecha de hortalizas. El hecho de incorporar una técnica exitosa, sencilla y económica aumentaba la autoestima de los productores argentinos y permitía a los productores utilizar su ingenio y creatividad para mejorar el sistema y adaptarlo a distintos cultivos. Desde el punto de vista ambiental esta tecnología también era muy importante, ya que permitía ahorrar agua, la que podía ser usada para otros fines. Según el INTA, esta técnica se podía adaptar a diversas situaciones y cultivos, siempre y cuando se trate de extensiones de cultivo relativamente pequeñas y para producción de autoconsumo con comercialización eventual de excedentes. | [68] |

En Latinoamérica diversos estudios se han llevado a cabo como el [69] presentado por Amaguaña & Llamba (2013), los cuales diseñaron e implementaron un sistema de manejo sustentable para suelo y agua en el sector sur oeste de la Universidad Politécnica Salesiana, la aplicación de la destilación solar (Kondenskompressor), en ambientes con temperatura media anual de 12°C y altitudes promedias de 3,058 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.); empleando botellas de plástico PET (polietileno) utilizando así la parte inferior de la botella de 2L y la parte superior de la botella de 5L; demostrando que los cultivos en esta zona requieren agua, pero en cantidades mínimas con una humedad relativa del 39,85%, por lo que les permitió ahorrar enormes cantidades de agua para el riego del cultivo.

3.2 La brecha en la agricultura peruana

En la actualidad, el 64% de la superficie agrícola del país carece de infraestructura de riego y sus cultivos solo dependen de la precipitación pluvia [62]. Además, la eficiencia de agua de riego es apenas del 40% (ver Tabla 2.3) [32], es decir, existe un alto desperdicio de agua, debido, entre varias razones, a su deficiente aplicación a los predios y el mal estado de conservación de las redes de conducción y distribución de riego. Más aún, solo el 12% de los cultivos se riegan bajo sistemas de riego tecnificado, mientras que el resto usa el riego por gravedad [70].

La estimación de la baja eficiencia se fundamentaría en la situación de la infraestructura de riego en el país, que según el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego MIDAGRI del Perú [59], la modernización de los sistemas de riego requiere alcanzar la sostenibilidad financiera para el adecuado mantenimiento y la buena gestión de la infraestructura existente.

Ante esta baja capacidad de regulación, la productividad agrícola disminuye de forma considerable, por lo que la FAO (2019) [71], señaló que la producción agrícola puede aumentar de forma considerable si existen métodos económicamente efectivos para almacenar agua antes de las etapas críticas del cultivo y aplicarla en periodos con escasez de lluvias, a fin de mejorar la producción de alimentos.

3.2.1. Sistemas de riego tecnificado en el Perú:

Una de las razones de los bajos rendimientos y pobre calidad de los productos agrícolas que se obtienen en la agricultura del país, se debe a que, en el proceso productivo del agro, se utilizan tecnologías tradicionales y deficientes, entre ellas,

sistemas de riego tradicionales por gravedad e inundación [31]. Por su parte, en zonas rurales y altoandinas, se encuentra la agricultura familiar como principal actividad económica en donde también se ve afectada por deficientes sistemas de riegos [65].

En cuanto a la eficiencia del manejo del agua de riego en la Perú, según diversos estudios del MIDAGRI [59] [72] [5], se ha concluido que la eficiencia de riego varía en un rango promedio del 28% a 52% (en promedio 40%), es decir, existe un alto desperdicio de agua, debido a su deficiente aplicación a los predios y el mal estado de conservación de las redes de conducción y distribución, que en su mayoría son de tierra.

Frente a estos desafíos, el estado peruano viene implementando diversos programas y proyectos que buscan hacer frente a los actuales retos en la gestión del recurso hídrico, orientados a trabajar en la calidad y gestión eficaz del agua, a reducir y mitigar la vulnerabilidad frente al cambio climático, entre otros. Con una mejor gestión del recurso hídrico, generando resiliencia y adaptación frente a los actuales efectos del cambio climático y la contaminación, se espera lograr una sostenibilidad en la producción de alimentos.

Para atender parte de la problemática de riego en el Perú, el Ministerio de Agricultura ha creado el Programa de Riego Tecnificado PRT [73], que tiene como objetivo promocionar y fomentar el reemplazo progresivo de los sistemas de riego tradicionales en el sector agrícola, por medio de la incorporación de sistemas modernos y eficientes, como los métodos de riego tecnificado por gravedad y presurizados.

Sin embargo, se debe de cumplir una serie de requisitos como ser propietario de un predio, tener regularizado la situación de tenencia y derecho de agua, no haber recibido incentivos de riego tecnificado anteriores y ser agricultores agrupados o asociados. Por lo que muchos de los agricultores quedan fuera del programa de riego tecnificado.

Por lo que en los últimos tiempos se viene incentivando proyectos en busca de la protección, conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos, mediante la captura, distribución y almacenamiento de agua a través del uso de la biodiversidad y conocimiento de prácticas ancestrales. Mediante el manejo eficaz del agua se espera garantizar el uso sostenible de la agrobiodiversidad y asegurar los medios de subsistencia de las poblaciones beneficiarias, brindando a la población diversidad de cultivos nativos de calidad con alto valor nutricional.

Integración de la red de riego: Los sistemas de riego integrado ofrecen una serie de ventajas que posibilitan racionalizar el agua disponible [74]. Cualquier sistema de riego

integrado debe someterse a un estudio previo para determinar si es el más idóneo [75], tomando en consideración desde el tipo de vegetación, hasta la forma de distribuir el agua para obtener el mejor rendimiento.

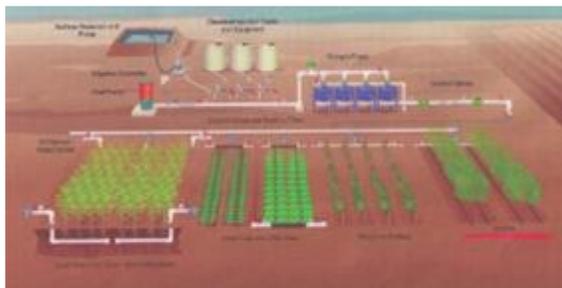


Figura 3.2. Sistemas de riego integrado

Los aspectos agronómicos del riego localizado se consiguen conduciendo el agua por medio de tuberías y aplicándola muy cerca de la planta, planta, con esto se eliminan las pérdidas por infiltración y evaporación en los canales, acequias, surcos, etc., lo cual supone un gran ahorro de agua (ver Figura 3.2) [76].

3.2.2. Iniciativas para reducir la brecha:

Para aumentar la capacidad de regulación hídrica en el Perú, se recomienda las siguientes actividades que deben ser impulsadas con la participación de los pequeños productores, el sector privado y el propio estado peruano: Fortalecer el Programa Nacional de Siembra y Cosecha de Agua, esta acción apunta a la construcción de reservorios y mini presas, sobre todo en áreas de las comunidades altoandinas que necesitan el recurso hídrico para su agricultura. Asistencia técnica para el desarrollo de nuevos cultivos y la incorporación de nuevas tecnologías, para incrementar la productividad de los pequeños agricultores. Fomentar la creación de organizaciones de usuarios de agua, que se encarguen de su mantenimiento y distribución, y que se almacene para tener un uso equitativo del recurso. Plan de ahorro y eficiencia en riego de la gran agricultura, para limitar la superficie de riego actual y asegurar que el agua ahorrada no sea utilizada para ampliar la superficie de riego. Mejorar la gestión del agua, con la participación eficaz de todas las partes interesadas. Lo cual requiere la propiedad compartida de los recursos, transparencia, y una combinación de enfoques verticales y enfoques “de abajo arriba”. Planificación y diseño de sistemas de riego: La dinámica de sistemas puede ser utilizada para planificar y diseñar nuevos sistemas de riego en el Perú. Al modelar diferentes escenarios climáticos y evaluar el impacto de las decisiones de gestión del agua a largo plazo, se pueden tomar decisiones más informadas y sostenibles en el manejo del agua en la agricultura.

4 Marco teórico

4.1 Diseño de experimento

Los modelos de diseño de experimentos son modelos estadísticos clásicos cuyo objetivo es averiguar si unos determinados factores influyen en una variable de interés y, si existe influencia de algún factor, cuantificar dicha influencia [77].

El objetivo del diseño de experimento es estudiar si cuando se utiliza un determinado tratamiento se produce una mejora en el proceso o no. Para ello se debe experimentar aplicando el tratamiento y no aplicándolo. Si la variabilidad experimental es grande, sólo se detectará la influencia del uso del tratamiento cuando éste produzca grandes cambios en relación con el error de observación. [78]

La metodología del diseño de experimentos estudia cómo variar las condiciones habituales de realización de un proceso empírico para aumentar la probabilidad de detectar cambios significativos en la respuesta; de esta forma se obtiene un mayor conocimiento del comportamiento del proceso de interés. [79].

La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad de los resultados muestrales. Es fundamental conocer los factores que influyen realmente y estimar esta influencia, para conseguir esto es necesario experimentar, variar las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable respuesta.

La terminología que se utilizará será:

- **Unidad experimental:** son los objetos, individuos, intervalos de espacio o tiempo sobre los que se experimenta.
- **Variable de interés o respuesta:** es la variable que se desea estudiar y controlar su variabilidad.
- **Factor:** son las variables independientes que pueden influir en la variabilidad de la variable de interés. **Factor tratamiento**, es un factor del que interesa conocer su influencia en la respuesta. **Factor bloque**, es un factor en el que

no se está interesado en conocer su influencia en la respuesta, pero se supone que ésta existe y se quiere controlar para disminuir la variabilidad residual.

- **Niveles:** cada uno de los resultados de un factor. Según sean elegidos por el experimentador o elegidos al azar de una amplia población se denominan factores de efectos fijos o factores de efectos aleatorios.
- **Tratamiento:** es una combinación específica de los niveles de los factores en estudio. Son, por tanto, las condiciones experimentales que se desean comparar en el experimento. En un diseño con un único factor son los distintos niveles del factor y en un diseño con varios factores son las distintas combinaciones de niveles de los factores.
- **Observación experimental:** es cada medición de la variable respuesta.
- **Tamaño del Experimento:** es el número total de observaciones recogidas en el diseño.
- **Interacción de factores:** existe interacción entre dos factores F_i y F_j si el efecto de algún nivel de F_i cambia al cambiar de nivel en F_j . Esta definición puede hacerse de forma simétrica y se puede generalizar a interacciones de orden tres o superior.
- **Diseño equilibrado o balanceado:** es el diseño en el que todos los tratamientos son asignados a un número igual de unidades experimentales.

4.2 Teoría de redes

La modelación de redes permite la resolución de múltiples problemas de programación matemática mediante la implementación de algoritmos especiales creados para tal fin, conocidos como algoritmos de optimización de redes [80].

La teoría de redes también puede ser utilizada para analizar sistemas de riego. Un sistema de riego típicamente consiste en una red de canales, tuberías y otros elementos de infraestructura que transportan agua desde su fuente hasta los cultivos. La teoría de redes puede ser utilizada para analizar la estructura de esta red, identificar cuellos de botella y otros puntos de congestión, y optimizar la distribución de agua para asegurar una irrigación eficiente y efectiva.

4.2.1. Conceptos básicos

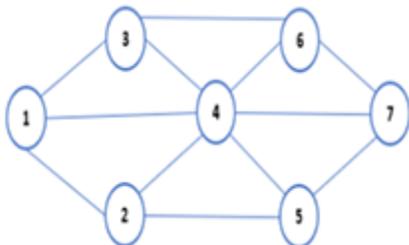


Figura 4.1. Ejemplo de una red (N, A)

Según Rockafellar (1985) [81], una gráfica es una serie de puntos llamados nodos que van unidos por unas líneas llamadas ramales o arcos (ver Figura 4.1). Mientras que una red es una gráfica que presenta algún tipo de flujo en sus ramales; en las redes se usa una simbología específica para denotar su tamaño y elementos que la constituyen, dicha notación es la (N, A) donde N representa el número de nodos que contiene la red y A representa el número de arcos o ramales.

Una red se dice árbol si es conectada y sin circuitos. Se excluye aquellas redes que constan de un solo nodo; además un árbol se caracteriza por cualquier de los siguientes postulados [82]:

- Conectada y sin circuitos.
- Existe una trayectoria única entre cada par de nodos.
- No tiene circuitos, pero exactamente uno se forma al añadir un arco.
- Es conectada, pero deja de serlo si algún arco se elimina.

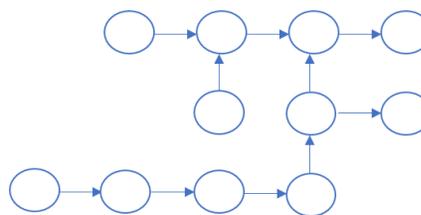


Figura 4.2. Ejemplo de un árbol

4.2.2. Teoría de grafos - arborescencia

En la teoría de grafos, según Agnarsson (2007) [83], una arborescencia es un caso particular de árbol y se caracteriza por ser:

- Una red dirigida en donde se debe especificar cual es el nodo raíz. Un vértice u llamado raíz y cualquier otro vértice v (donde hay exactamente una trayectoria dirigida de u a v).
- Una arborescencia se puede definir de manera equivalente como un dígrafo enraizado en el que el camino desde la raíz hasta cualquier otro vértice es único.
- Existen varias rutas.
- Poseen $n - 1$ arcos

Para resolver los problemas de arborescencia (asociado con el concepto de árbol con raíz) se utiliza algoritmos como el método de Dijkstra [87] que sirve para obtener la arborescencia de rutas más cortas.

Un conjunto de arcos $F \subset A$ se dice que forma un bosque en una red G (ver Figura 4.3), si cada componente de la subred compuesta por arcos de F y los nodos incidentes a ella es un árbol. En otras palabras, F es un bosque si y sólo si no se incluyen circuitos elementales en F . Un bosque máximo en G se define como un bosque que no está estrictamente contenido en otro bosque G .

Un árbol de expansión de G es un árbol que pasa por cada nodo de G , como en la Figura 4.4

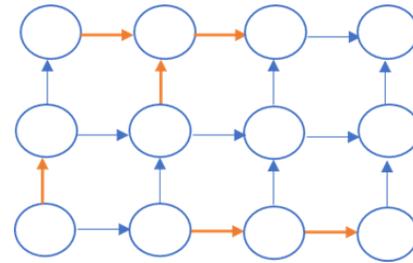


Figura 4.3. Ejemplo de un bosque

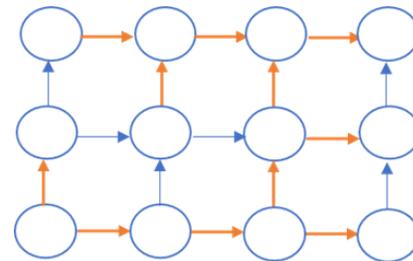


Figura 4.4. Ejemplo de un árbol de expansión

Las características que debe de cumplir un árbol según Rockafellar (1985) [81] son las siguientes:

Teorema 1: Un árbol es una red (o gráfica) caracterizada por cualquier de los siguientes postulados:

- Conectada y si circuitos.
- Existe una trayectoria única entre cada par de nodos.
- No tiene circuitos, pero exactamente uno se forma al añadir un arco.
- Es conectada, pero deja de serlo su algún arco se elimina.

Teorema 2: El teorema de expansión indica que; para cualquier red G , las siguientes propiedades de un conjunto de arcos $F \subset A$ son equivalentes:

- F forma un bosque máximo para G .
- F forma un árbol de expansión para cada componente de G que no sea un no único.

- F forma un bosque tal que $|F| = |N| - p$; donde p es un número de componentes de G .
- Las columnas e_j de la matriz de incidencia E correspondiente a los arcos $j \in F$ forman una base para el espacio de las columnas de E .

El problema de árbol de expansión mínima juega un papel importante en los problemas de redes de flujo [81]. Para resolver el problema de ruta más corta se necesita construir un árbol con raíz y para resolver redes a costo mínimo se usan árboles para encontrar la solución. Una característica especial de los problemas de árbol de expansión mínima es que los arcos no son dirigidos (i, j) o (j, i) se refieren al mismo arco.

Dada una red $G = (N, A)$ no dirigida con $n = |N|$ nodos y $m = |A|$ arcos con costos o longitudes c_{ij} asociados a cada arco $(i, j) \in A$, se desea encontrar un árbol de expansión, llamado el árbol de expansión mínima, que tenga el menor costo (o longitud) de los arcos que lo constituyen, medido como la suma de los costos de los arcos. En la Figura 4.5 se muestra una red no dirigida, árbol de expansión y árbol de expansión mínima:

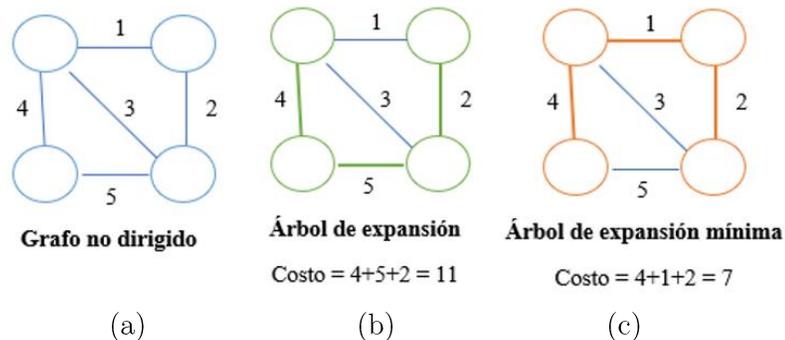


Figura 4.5. Grafo no dirigido, árbol de expansión, árbol de expansión mínima

Los algoritmos para resolver el problema de árbol de expansión mínima son de la característica del tipo “glotón”, en el sentido de que en cada paso aumentan un arco de costo mínimo como candidato de la lista, siempre y cuando este arco no forme ningún circuito con los arcos ya seleccionados [84]. Estos algoritmos mantienen un bosque que contiene arcos que ya han sido seleccionados y se aumentan uno o más arcos para aumentar el tamaño del bosque. Estos algoritmos son de Kruskal, Prim y Sollin.

Se puede modelar una red de riego como un grafo, donde los nodos representan las parcelas y las aristas representan los canales o tuberías de riego. Cada arista tiene un

costo asociado que representa el costo de implementar estos canales o tuberías. En resumen, la teoría de redes y los grafos son herramientas útiles para resolver problemas de planificación y optimización en redes de riego. Al utilizar estos métodos, se puede identificar la forma más eficiente de distribuir los recursos y minimizar los costos, mejorando la eficiencia y la sostenibilidad de nuestras operaciones.

4.2.3. Diseño de redes de riegos

El diseño de un sistema de riego es un trabajo complejo debido a la gran cantidad de factores que intervienen en el proceso [85]. De esta manera su estudio comienza con el cálculo de las necesidades de riego, que de forma resumida trata de conocer el consumo de agua necesario por los cultivos en la época de mayor necesidad, y del posterior diseño en plano del sistema.

El diseño de los sistemas de riego consiste en la disposición de los distintos elementos del sistema con el objetivo de maximizar la efectividad de este de la forma más económica [86].

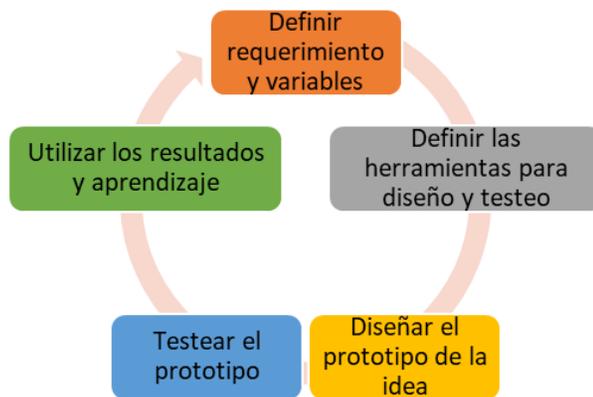


Figura 4.6. Etapas para diseñar e implementar red de riego

Según Sela G. (2021) [87], el diseño de un sistema de riego requiere buen conocimiento del cultivo, las condiciones del campo, el suelo y el agua; y las herramientas que se han usado en el diseño de los diferentes sistemas de riego son de prototipado el cual está relacionado con la mejora continua y el ciclo de Deming [88] que consiste en un proceso iterativo enfocado en diseñar, implementar, medir y ajustar a un plan determinado. Las etapas para diseñar e implementar un prototipo se muestran en la Figura 4.6.

4.3 Dinámica de sistemas

Es un enfoque de modelado y análisis de sistemas complejos y dinámicos que se basa en la teoría de sistemas y la simulación computarizada. Esta metodología se utiliza para estudiar cómo los diferentes componentes de un sistema interactúan y evolucionan con el tiempo [89]. La ventaja de modelar un sistema de riego es que se puede iniciar el estudio a partir de variables básicas. Luego, se puede simular los comportamientos y estudiar la dinámica.

El modelo de dinámica de sistemas en el riego y agua en la agricultura es una herramienta utilizada para analizar la gestión del agua en los sistemas agrícolas [90]. Este modelo se basa en la teoría de la dinámica de sistemas, que se centra en el análisis de sistemas complejos y dinámicos que evolucionan con el tiempo [91]. Con el modelo de dinámica de sistemas, se pueden realizar simulaciones para analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios. Por ejemplo, se puede simular el impacto de una sequía prolongada en la cantidad de agua disponible para riego y la producción de cultivos, o el efecto de la implementación de políticas de conservación del agua en la sostenibilidad del sistema [92].

En la Figura 4.7 se observa el diagrama de bucle causal (o *Causal Loop Diagram* *CLD* por sus siglas en inglés) de un modelo de riego simple según Bala, Arshad, & Noh (2018) [93]. Este modelo es útil para tomar decisiones informadas sobre la gestión del agua en la agricultura y mejorar la eficiencia del uso del agua en los sistemas agrícolas. Permite analizar la interacción entre los diferentes componentes del sistema y evaluar cómo las decisiones de gestión del agua afectan a la sostenibilidad del sistema en el largo plazo.

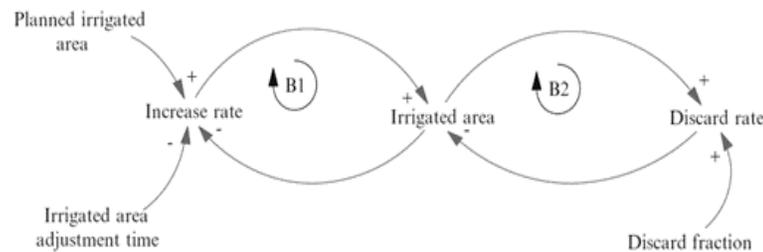


Figura 4.7. Diagrama de bucle causal de un modelo de riego simple

El diagrama de bucle causal riego explica cómo un área regada depende de diferentes variables y puede acentuar otros comportamientos. Hoy en día es importante sembrar diferentes cultivos, pero teniendo en cuenta que no se debe desechar demasiada agua. Este modelo de literatura puede ser transformado y aplicado a un cultivo real.

En la Figura 4.8 se muestra el diagrama stock-flujo (*Stock and Flow Diagram SFD*) de un modelo de riego simple [93]. Las tres variables principales son: área regada, tasa de aumento del área regada y tasa de descarte del área de riego. Aquí se tiene una variable de stock que es el área regada. Esta variable indica la condición del riego y aumenta según la “tasa de incremento” de la entrada. Del mismo modo también disminuye según la” tasa de descarte” de salida. Además, el área regada se mide por cantidad, mientras que la tasa de aumento y la tasa de abandono se miden en cantidad por unidad de tiempo.

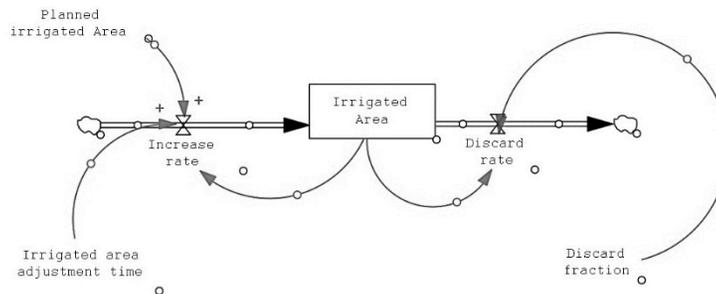


Figura 4.8. Diagrama stock-flujo del modelo de riego simple

En la dinámica de sistemas, se utiliza una representación gráfica llamada diagrama de flujo de stocks y flujos para modelar los diferentes componentes de un sistema y cómo están conectados [93]. En este tipo de diagrama, los stocks representan las variables que cambian con el tiempo, como la cantidad de dinero en una economía o la población de una ciudad, mientras que los flujos representan las causas de esos cambios, como la entrada y salida de dinero o las tasas de natalidad y mortalidad. Una vez que se ha creado un modelo de un sistema usando un diagrama de flujo de stocks y flujos, se puede utilizar software de simulación para ejecutar el modelo y explorar cómo el sistema evoluciona a lo largo del tiempo. La simulación permite probar diferentes escenarios y condiciones para ver cómo afectan al sistema en su conjunto [94].

Algunas aplicaciones de la dinámica de sistemas en el riego de cultivos incluyen:

- Modelado del sistema de irrigación, en donde se puede utilizar la dinámica de sistemas para modelar el comportamiento del sistema de irrigación, incluyendo el flujo de agua, la eficiencia del riego y la producción de cultivos.
- Simulación de escenarios, utilizando los modelos de dinámica de sistemas, se pueden realizar simulaciones para analizar el comportamiento del sistema de

irrigación bajo diferentes condiciones, como cambios en el clima o la demanda de agua.

- Optimización de la gestión del agua, en que la dinámica de sistemas puede ayudar a los agricultores y administradores de recursos hídricos a optimizar el uso del agua, identificando las mejores prácticas de irrigación y los cambios necesarios en la infraestructura.
- Evaluación del impacto del cambio climático, con los modelos de dinámica de sistemas, se puede evaluar el impacto del cambio climático en el sistema de irrigación y en la producción de cultivos, y planificar medidas de adaptación.

La dinámica de sistemas ha contribuido significativamente a mejorar la eficiencia del riego en la agricultura. La utilización de la dinámica de sistemas permite modelar y simular el comportamiento de variables complejas que influyen en la eficiencia del riego, como la programación del riego, la disponibilidad de agua, la demanda de agua de los cultivos, las pérdidas de agua y otros factores ambientales y socioeconómicos [95].

Los modelos de dinámica de sistemas pueden ser utilizados para evaluar diferentes estrategias de gestión del agua y simular diferentes escenarios climáticos, lo que permite a los agricultores y gestores del agua identificar las mejores prácticas para mejorar la eficiencia del riego y reducir el consumo de agua en la agricultura [96]. Además, la dinámica de sistemas permite evaluar el impacto de las decisiones de gestión del agua en la eficiencia del riego a largo plazo, lo que ayuda a los agricultores y gestores del agua a tomar decisiones más informadas y sostenibles en el manejo del agua en la agricultura.

5 Metodología

La propuesta del presente trabajo de investigación es implementar un sistema de riego y evaluar su eficiencia de agua de un cultivo, para lo cual se sigue la siguiente metodología:

Como primer paso se hace la elección del cultivo y evaluación de posibles sistemas de riego, en este paso se deberá considerar la zona del cultivo, temporada de siembra y cosecha, y condiciones ambientales como clima, temperatura y humedad del entorno. Como segundo paso se planifica el diseño de experimento (ver Apéndice 1) con el fin de asegurar las variables y factores correctos que intervienen en el proceso [77], se propone las hipótesis y se efectúa el diseño de experimento. El tercer paso es evaluar y analizar los resultados obtenidos a fin de implementar o cambiar el sistema de riego considerando la eficiencia del riego. Como cuarto paso se analiza la eficiencia de riego bajo el enfoque de dinámica de sistemas, utilizando un modelo de riego simple propuesto por Bala, Arshad, & Noh (2018) [93]; los resultados se analizarán identificando comportamientos de interés previamente definidos. Como último paso se proponen alternativas de mejorar y su implementación (ver Figura 5.1).

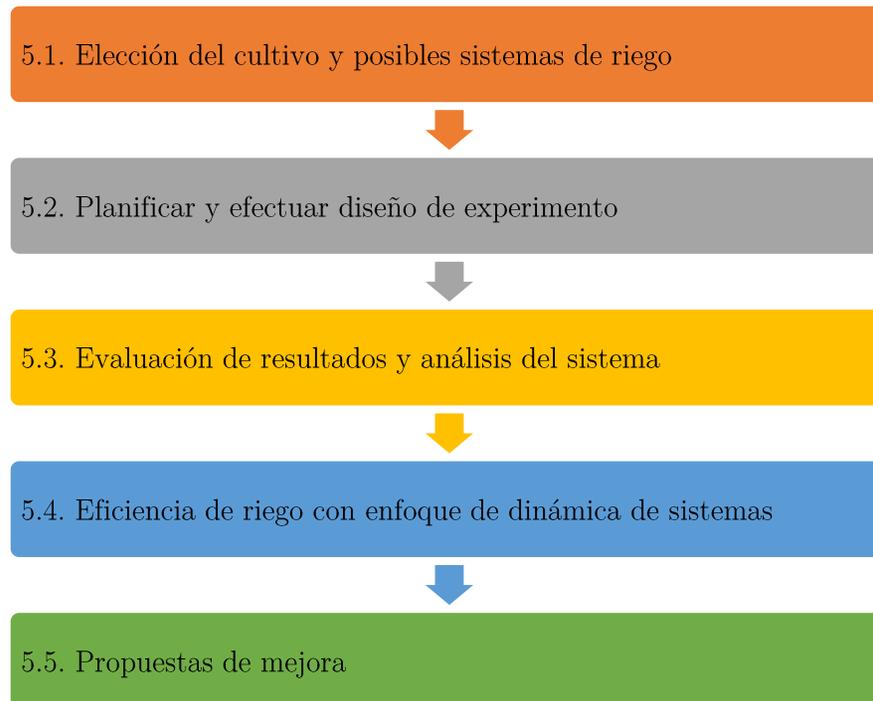


Figura 5.1. Metodología

6 Caso de estudio

La agricultura peruana ha tenido un crecimiento impresionante durante las últimas dos décadas; sin embargo, el rendimiento del sector agrícola ha sido disparado [97]. De acuerdo con el reporte del Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento y Banco Mundial (2017) titulado “Tomando impulso en la agricultura peruana” [98], señala que el análisis de las tendencias y brechas en materia de productividad confirma el argumento de que el sector agrario en el Perú engloba tres mundos muy diferentes la costa, altamente productiva y tecnológicamente avanzada; la sierra, relativamente improductiva y tecnológicamente atrasada; y una selva heterogénea, donde la agricultura moderna y la agricultura tradicional coexisten lado a lado.

6.1 Elección del cultivo y posibles sistemas de riego

En el Perú, la producción nacional de ajíes, pimientos y rocotos es superior a las 200 mil toneladas (Tn.) y ha venido evolucionado favorablemente en los últimos años según el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MINAGRI, 2020) [99]. El Perú cuenta con más de 350 variedades de ajíes, rocotos y pimientos registradas, cultivados en 24 departamentos, siendo los más reconocidos el ají amarillo, el ají panca, el rocoto y el pimiento morrón [100].

Se calcula que en el Perú existen alrededor de 10 mil productores agrarios dedicados al cultivo de ajíes y pimientos a través de la agricultura familiar [101], y que han sabido preservar hasta estos días toda esta diversidad de ajíes y pimientos que hoy se disfruta y que han contribuido con su esfuerzo al “boom” de la gastronomía peruana.

El pimiento morrón (*Capsicum annum L.*) es una hortaliza de fruto, muy importante desde el punto de vista comercial y nutricional, pues se utiliza tanto en fresco como en procesado y es rico en vitamina C [102]; representa una fuente de ingreso importante para la agricultura familiar en el Perú. Además, su demanda aumenta continuamente y con ella su cultivo, producción y comercio. Las mejores condiciones ambientales para su crecimiento se desarrollan en climas cálidos y templados, con una humedad relativa óptima es de 50-70%, siendo las temperaturas máximas y mínimas [103] para sus distintas fases las siguientes (ver Tabla 6.1):

Tabla 6.1. Temperaturas críticas para el pimiento

| Fases del cultivo | Temperatura Mínima (°C) | Temperatura Óptima (°C) | Temperatura Máxima (°C) |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Germinación | 20-25 | 13 | 40 |
| Crecimiento vegetativo | 20-25 (días) 16-18 (noche) | 15 | 35 |
| Floración y fructificación | 26-28 (días) 18-20 (noche) | 18 | 35 |

Para el caso del pimiento morrón, según el MINAGRI [99] recomienda realizar un riego moderado y constante y preferiblemente por goteo debido al posible desarrollo de hongos. En ningún momento se debe dejar que la tierra se seque durante la etapa de crecimiento vegetativo, floración y durante la época de desarrollo del fruto, mantener la tierra uniformemente húmeda ayuda a evitar la podredumbre de la flor [102]. Por otro lado, el exceso de agua en la tierra puede hacer que los pimientos se partan, pudran y hasta aparezcan hongo y echen a perder [103]. Entonces, lo mejor es el riego controlado con la cantidad necesaria de agua que la planta necesita.

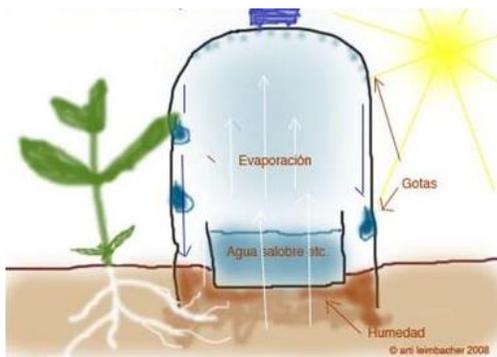


Figura 6.1. Sistema de riego solar propuesto

Por lo que se propone, el sistema de riego solar a fin de comprobar la efectividad de consumo de agua para el cultivo (ver Figura 6.1); pues con esta técnica de riego se permite lograr un aprovechamiento óptimo del agua empleando la energía del sol como elemento motor del proceso del destilado y movimiento del agua [9]. Además, de ser un sistema simple y eficaz mediante el cual es posible reducir la cantidad de agua de riego en hasta cinco veces con respecto a los sistemas tradicionales de riego [7].

6.2 Planificar y efectuar diseño de experimento

El objetivo general del experimento es medir la eficiencia de riego solar a fin de lograr optimizar el consumo de agua con una adecuada productividad de cosecha del pimiento morrón. Mientras que los objetivos específicos del experimento son: evaluar

si es viable la incorporación del sistema de riego en zonas de sequía, evaluar la respuesta agronómica del cultivo a la aplicación del riego solar mediante índices de producción, definir los consumos hídricos el cultivo a través de la contabilización volumétrica y eficiencia del uso del agua; y observar el comportamiento de del cultivo en el tiempo que dure el experimento (los pasos a seguir se detallan en el Apéndice 1).

Las variables independientes no controlables que son sensibles para el diseño del experimento son las siguientes:

- **Clima:** Esta variable se refiere a las transiciones en las condiciones climáticas como las desviaciones típicas, los fenómenos extremos, en todos los niveles temporales y espaciales. Por ejemplo, la precipitación pluvial se puede usar para proyectar el efecto en la producción de cultivos.
- **Temperatura:** La temperatura del ambiente es importante a fin de calcular la rapidez del desarrollo de los cultivos o insectos.
- **Humedad:** Unos niveles suficientes de humedad del suelo son una condición importante para la formación adecuada de las plantas y el alto rendimiento de los cultivos. Para la planta, el agua no sólo sirve como agente de restauración de la humedad, sino también como regulador de la temperatura

Mientras que las variables de respuesta se detallan a continuación:

- **Consumo hídrico:** Se define como el agua consumida por la planta, la cual se medirá cada semana hasta la primera cosecha.
- **Altura de planta:** Se medirá el crecimiento de la planta cada semana hasta la primera cosecha.
- **Rendimiento:** Se define como la cantidad de fruto que rinde cada planta durante la primera cosecha incluyendo la inspección visual del fruto para determinar la calidad.

El diseño de experimento se efectúa en época de sequía (Julio – Diciembre del 2022) en el distrito de San Ramón, provincia de la Merced en el departamento de Junín – Perú (Figura 6.2), la ubicación exacta es (-11,136490; -75,377782). Para este caso de utilizará el cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annum L.*).

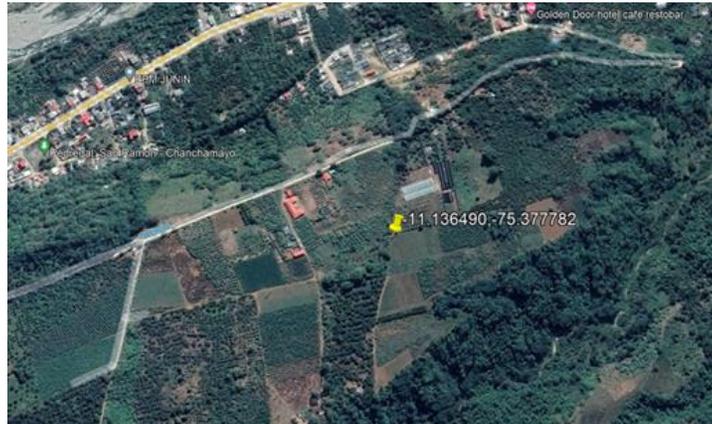


Figura 6.2. Ubicación de proyecto – San Ramón – La Merced – Perú

Se propone un diseño de experimento bloqueado para el cultivo de pimienta morrón siendo la hipótesis nula y alterna las siguientes:

- H₀** Al menos uno de los métodos de aplicación de riego solar permite dotar de agua al cultivo de forma eficiente para alcanzar la productividad normal.
- H₁** El método de aplicación de riego solar no permite dotar de agua al cultivo de forma eficiente para alcanzar la productividad normal.

El modelo general del diseño de experimento para el cultivo de pimienta morrón se describe en la Figura 6.3.

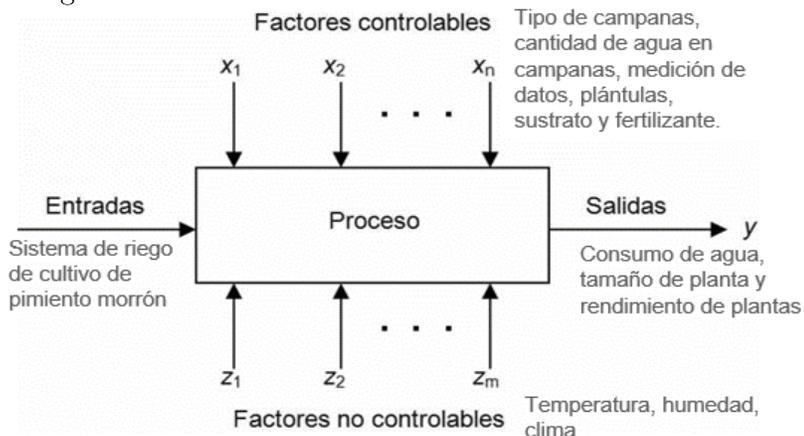


Figura 6.3. Modelo general del diseño de experimento

El esquema operativo del riego solar con produce agua destilada con radiación solar a partir de la colocación de una botella de plástico con agua (botella pequeña) a unos cuantos centímetros de la planta, esta botella se tapa con otra más grande (botella grande o campana) que la cubra completamente para que la humedad condensa baje por las paredes interiores y caiga en forma de goteo solar a la tierra. Es un sistema que atrapa el agua evaporada de la tierra y del depósito que hay en el interior gracias a la energía solar, tiene doble función porque de noche recoge también cierta cantidad de rocío. En la Figura 6.4 se grafica el funcionamiento del sistema de riego [9]. Los materiales que se utilizaron para la implementación del sistema de riego solar se detallan en el Apéndice 2.

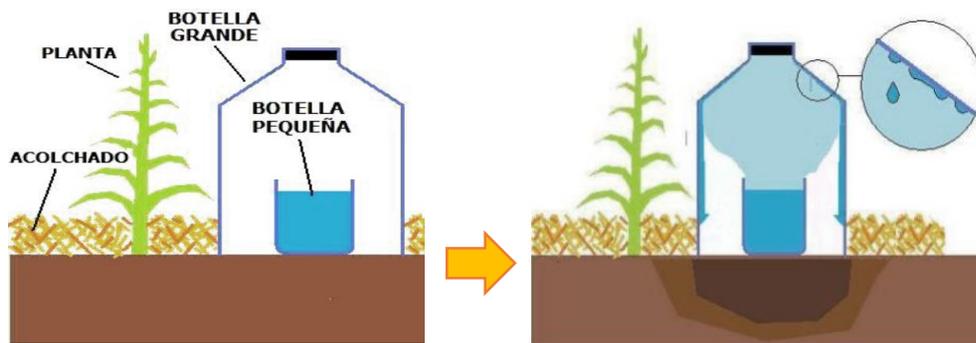


Figura 6.4. Sistema operativo de riego solar

6.2.1. Eficiencia de campana de 3L vs. 7L

Como primer paso, se compara la muestra de agua condensada por semana en centilitros (cl) de la campana de 3L con la campana de 7L; de este modo, se determina cuál de ellas es la más eficiente para el riego. Para corroborar lo anterior, se sugiere probar la hipótesis de igualdad de dispersiones (homocedasticidad) y posteriormente la prueba de igualdad de medias [77] [79].

Además, es indispensable corroborar la independencia y normalidad de datos. En el Apéndice 3, se corrobora que los datos independientes y en el Apéndice 4 que los datos siguen una distribución normal.

En la Tabla 6.2 se muestra los valores para ambas campanas evaluadas. El experimento se ejecutó a un nivel de significancia α del 5%.

Tabla 6.2. Muestra de agua condensada cl/planta semanal

| Tipo de campana | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| De 3L | 329 | 374 | 389 | 395 | 352 | 350 | 358 | 326 | 325 | 413 |
| De 7L | 395 | 418 | 365 | 451 | 376 | 341 | 383 | 385 | 369 | 490 |

Corroborada la independencia y normalidad de los datos (Apéndice 3 y Apéndice 4 respectivamente), se procede con la prueba de igualdad de homocedasticidad a un nivel de significancia α del 5%. En la Tabla 6.3 se presentan los datos a considerar:

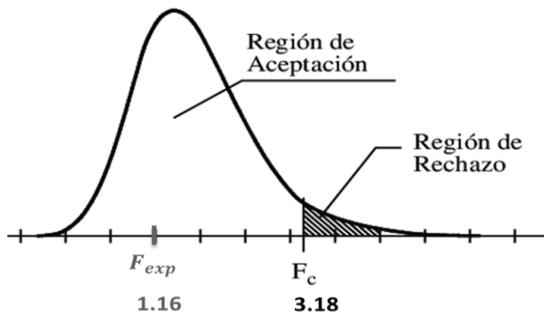
Tabla 6.3. Comparación de dos poblaciones (Campana de 3L y 7L)

| Tipo de campana | Muestra n_i | Media cl/planta semanal | Desviación estándar σ^2 |
|-----------------|---------------|-------------------------|--------------------------------|
| De 3L | 10 | 361,1 | 30,86 |
| De 7L | 10 | 397,3 | 44,39 |

Prueba de homocedasticidad: Se hace uso de la prueba F de Fisher (debido a la independencia de los datos) [77], que permite contrastar si 2 muestras presentan igualdad de varianzas. Para ello se plantea las siguientes hipótesis:

$$H_0: \sigma^2_{3L} = \sigma^2_{7L} \quad \text{Existe igualdad de dispersiones} \quad (2)$$

$$H_1: \sigma^2_{3L} < \sigma^2_{7L} \text{ o } \sigma^2_{3L} > \sigma^2_{7L} \quad \text{No existe igualdad de dispersiones} \quad (3)$$



Según la Figura 6.6 se observa que F_c (valor crítico) es mayor al F_{Exp} (experimento); por lo que se acepta la hipótesis nula H_0 y se rechaza la hipótesis alterna H_1 .

Se concluye que la dispersión de ambas muestras es igual.

Figura 6.5. Prueba de igualdad de varianza – Fisher F

Prueba de igualdad de medias: Para comprobar la eficiencia de riego, se aplicará la prueba de igualdad de medias [79]. La hipótesis nula y alternativa se detallan a continuación:

$$H_0: \mu_{7L} = \mu_{3L} \quad \text{La media del agua condensada de la campana de 7L es igual a la media de la campana de 3L} \quad (4)$$

$$H_1: \mu_{7L} > \mu_{3L} \quad \text{La media del agua condensada de la campana de 7L es mayor a la media de la campana de 3L} \quad (5)$$

Se utiliza el estadístico de prueba T-student (t), debido a que las sumas de las muestras son menores a 30 y siguen una distribución normal [77].

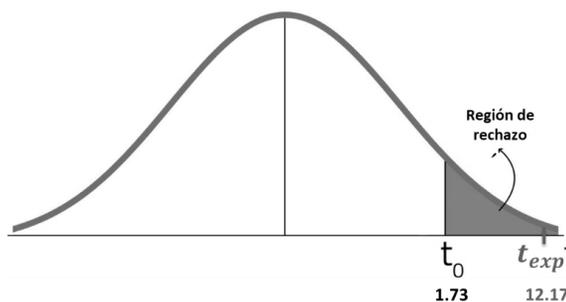


Figura 6.6. Prueba de igualdad de media – T-student

Según la Figura 6.6 se observa que t_{exp} es mayor al t_0 (crítico); por lo que se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alterna H_1 , que indica que la media del agua condensada de la campana de 7L es mayor a la media de la campana de 3L

Por lo tanto, se puede afirmar que la eficiencia de la campana de 7L es mejor que la de 3L. Además, de que se observó que la humedad en el suelo fue mayor en la campana de 7L que la 3L; por lo que, el diseño de experimento se efectuará con la campana de 7L.

6.2.2. Diseño de experimento bloqueado para campanas 7L

Se decide utilizar un Diseño Bloque Completos al Azar (DBCA) debido a que se desea controlar todos los factores que puedan afectar a las variables observadas (cantidad de agua condensada, tamaño de planta y rendimiento) reduciendo los errores experimentales y dando mayor precisión al experimento [78]. La ecuación tradicional del DBCA [77] está definida por:

$$Y_{ij} = \mu + t_i + \beta_j + e_{ij} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, k \\ j = 1, 2, \dots, n \end{array} \quad (6)$$

Donde μ es la media global, t_i es el efecto del tratamiento i -ésimo, β_j es el efecto del bloque j -ésimo, y e_{ij} es el término del error $N \sim (\sigma, \sigma^2)$.

La hipótesis nula y alterna del DBCA son:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \quad \begin{array}{l} \text{Las medias de todos los tratamientos son} \\ \text{iguales} \end{array} \quad (7)$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j; i \neq j \quad \begin{array}{l} \text{Existen al menos un par de pruebas} \\ \text{diferentes} \end{array} \quad (8)$$

O también puede ser:

$$H_0: t_1 = t_2 = t_3 = 0 \quad \begin{array}{l} \text{Los efectos de los factores sobre la media} \\ \text{es cero} \end{array} \quad (9)$$

$$H_1: t_i \neq 0 \quad \begin{array}{l} \text{Existen al menos un nivel en el factor que} \\ \text{tienen un efecto significativo en la media} \end{array} \quad (10)$$

El experimento consta de analizar el crecimiento de las plantas y rendimiento con la cantidad de campanas junto con las parcelas, en la Tabla 6.4 se muestra la información de los factores:

Tabla 6.4. Información del factor

| Factor | Nivel Valores | Detalles |
|--------------------|---------------|---|
| Número de campanas | 3 | 1 campana de 7L 2 campanas de 7L 3 campanas de 7L |
| Parcelas | 3 | A, B, C |

El DBCA se utiliza debido a que pudiera existir algunos efectos en el tipo de suelo, topografía del terreno, o de las condiciones que rodean al área donde se realizará el experimento [77].

Las características del experimento se detallan a continuación (ver Tabla 6.5):

Tabla 6.5. Características del experimento DBCA

| Característica | Descripción |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| Tipo de diseño | Diseño de bloques completos al azar |
| Número de tratamientos | 3 |
| Número de repeticiones | 3 |
| Ancho de parcela | 3 metros |
| Largo de parcela | 2 metros |
| Número de plantas por parcela | 6 |
| Distancia de repeticiones | 1,5 metros |
| Distancia de tratamientos | 1,0 metros |
| Distancia entre plantas | 0,5 metros |
| Distancia entre hileras | 1,0 metros |
| Área total | 180 metros |

En el Apéndice 4 se muestra la distribución de los tratamientos sorteados al azar del experimento para el cultivo del pimiento morrón.

Dado que se trabaja con plantas, y éstas tienen un comportamiento según su etapa de crecimiento y desarrollo, se decide realizar el diseño del experimento en tres estadios.

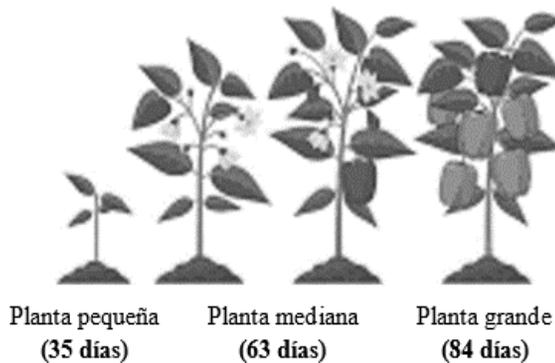


Figura 6.7. Crecimiento y desarrollo del pimiento morrón en estadios

A los 35 días, tiempo promedio que transcurrió desde el traslado de la plántula al terreno hasta la floración.

A los 63 días, tiempo que transcurrió desde el traslado de la plántula al terreno hasta inicio del fruto.

Y finalmente, a los 84 días, tiempo que transcurrió desde el traslado de la plántula al terreno hasta la cosecha del fruto (ver Figura 6.7).

A continuación, se presentan los datos obtenidos del análisis de variancia ANOVA para cada uno de los estadios previamente explicados, para ello se hizo uso del software Minitab versión 21.4.1 [104].

La tabla ANOVA ayuda a averiguar si la diferencia en los valores medios es estadísticamente significativa, y también revela indirectamente si una variable independiente está influyendo en la variable dependiente [78].

El ANOVA utiliza la prueba F para determinar si la variabilidad entre las medias de los grupos es mayor que la variabilidad de las observaciones dentro de los grupos. Si ese cociente es lo suficientemente grande, se puede concluir que no todas las medias son iguales [79].

DBCA a los 35 días – Planta pequeña: Según la Tabla 6.6, para los tratamientos el F_0 del experimento es mayor que al $F_{\text{crítico}}$, entonces se rechaza la hipótesis nula H_0 . Por lo tanto, se concluye que la cantidad de campanas si tiene un efecto significativo. Mientras que, para los bloques al tener un $p - \text{value} = 0,387$ mayor al 0,05 (α), se acepta H_0 , concluyendo que no existe efectos debidos a los bloques.

Tabla 6.6. ANOVA para planta de 35 días

| Fuente de variabilidad | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrados medio | F_o | $p - \text{value}$ | $F_{\text{crítico}}$ |
|------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|--------|--------------------|----------------------|
| Tratamientos | 2 250 575 | 2 | 1 125 288 | 269,98 | 0,000 | 6,94 |
| Boques | 10 133 | 2 | 5 067 | 1,22 | 0,387 | 6,94 |
| Error | 16 672 | 4 | 4 168 | | | |
| Total | 2 277 381 | 8 | | | | |

En el Apéndice 6, se detalla el modelo lineal general de Minitab.

DBCA a los 63 días – planta mediana: En la Tabla 6.7, se muestra la ANOVA para las plantas de 63 días. En donde se concluye que, para los tratamientos, el número de campanas si tienen un efecto significativo, en tanto, el bloque no tiene efecto significativo.

Tabla 6.7. ANOVA para planta de 63 días

| Fuente de variabilidad | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrados medio | F_o | p – <i>value</i> | $F_{crítico}$ |
|------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|---------|--------------------|---------------|
| Tratamientos | 17 417 032 | 2 | 8 708 516 | 1270,45 | 0,000 | 6,944 |
| Boques | 17 919 | 2 | 8 959 | 1,31 | 0,366 | 6,94 |
| Error | 27 419 | 4 | 6 855 | | | |
| Total | 17 462 369 | 8 | | | | |

En el Apéndice 7, se detalla el modelo lineal general de Minitab.

DBCA a los 84 días – planta grande: En la Tabla 6.8 se muestra la ANOVA para las plantas de 84 días, que al igual que las otras dos tablas anteriores indica que para los tratamientos, el número de campanas si tienen un efecto significativo, en tanto, el bloque no tiene efecto significativo.

Tabla 6.8. ANOVA para planta de 84 días

| Fuente de variabilidad | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrados medio | F_o | p – <i>value</i> | $F_{crítico}$ |
|------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|-------|--------------------|---------------|
| Tratamientos | 13 697 766 | 2 | 1 125 287 | 897 | 0,000 | 6,944 |
| Boques | 19 630 | 2 | 5 066 | 1,29 | 0,370 | 6,94 |
| Error | 30 526 | 4 | 4 168 | | | |
| Total | 13 747 922 | 8 | | | | |

En el Apéndice 8, se detalla el modelo lineal general de Minitab.

6.2.1. Comparaciones por parejas de Fisher

Haciendo uso del Minitab, se realiza las comparaciones por parejas utilizando el método LSD de Fisher a cada uno de los tres estadios a fin de analizar la eficiencia de las tres campanas. En la Tabla 6.9 se presenta el resumen de los resultados:

Tabla 6.9. Comparaciones para consumo de agua cl/planta

| Consumo de agua cl semanal | N° Campanas | Media | Agrupaciones |
|-----------------------------------|-------------|----------|--------------|
| Para 35 días (ver Apéndice 9) | 3 | 1 795,78 | A |
| | 2 | 1 276,56 | B |
| | 1 | 575,39 | C |
| Para 63 días (ver Apéndice 10) | 3 | 4 456,00 | A |
| | 2 | 2 290,72 | B |
| | 1 | 1 094,72 | C |
| Para 83 días (ver Apéndice 11) | 3 | 6 456,00 | A |
| | 2 | 3 154,67 | B |
| | 1 | 1 443,39 | C |

Con dicha información se procede a analizar el consumo hídrico del cultivo, el crecimiento de las plantas, y se evalúa también, el rendimiento del pimiento morrón al momento de la cosecha.

6.3 Evaluación de resultados y análisis del sistema

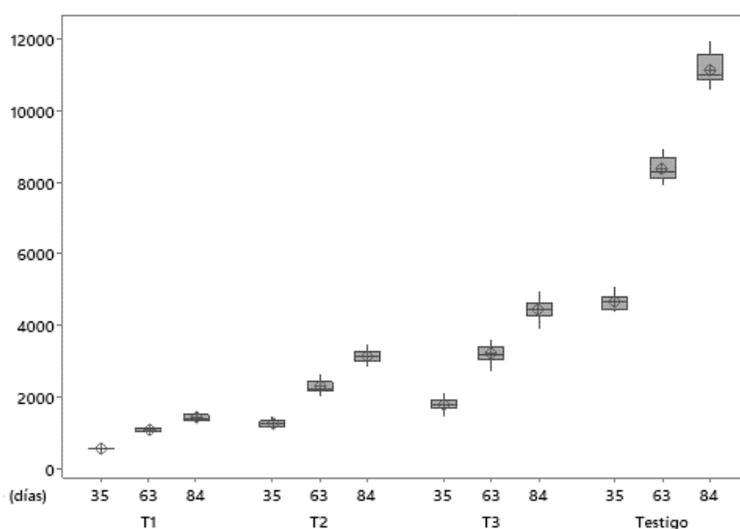
La evaluación de la respuesta agronómica del pimiento morrón se compara con el testigo y se analiza los resultados tanto para el consumo hídrico, altura del cultivo y rendimiento.

6.3.1. Consumo hídrico

La Tabla 6.10 muestra el consumo hídrico promedio (en centilitro por planta) para los tratamientos evaluado en cada uno de los tres estadios propuestos (35, 63 y 83 días), así como el ahorro del agua respecto al testigo. Sin embargo, no basta con este análisis, ya que debe considerarse el desarrollo de la planta y el rendimiento de pimientos para obtener conclusiones, pues si bien el tratamiento T1 de una campana por planta es quien presenta mayor ahorro, no se sabe cómo fue su productividad o desarrollo de la planta.

Tabla 6.10. Consumo hídrico (cl) y ahorro (%)

| Tratamiento | 35 días | | 63 días | | 84 días | |
|----------------------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|
| | Promedio (cl) | Ahorro (%) | Promedio (cl) | Ahorro (%) | Promedio (cl) | Ahorro (%) |
| T1: 1 | 575,39 | 87,85 | 1 094,72 | 86,90 | 1 443,39 | 87,06 |
| T2: 2 | 1 276,56 | 73,05 | 2 290,72 | 72,65 | 3 154,67 | 71,71 |
| T3: 3 | 1 795,78 | 62,09 | 4 456,00 | 46,80 | 6 456,00 | 42,11 |
| Testigo - riego localizado | 4 737,50 | - | 8 376,44 | - | 11 153,10 | - |



En la Figura 6.8, se presenta un diagrama de cajas que permite explicar la distribución del consumo hídrico promedio de los experimentos; así como, la comparación entre los tratamientos.

Figura 6.8. Consumo hídrico (cl)

6.3.2. Altura del cultivo

En la Tabla 6.11 se presenta la altura promedio alcanzado en centímetros (cm) del cultivo y la comparación del crecimiento respecto al testigo.

Tabla 6.11. Altura de la planta (cm)

| Tratamiento | 35 días | | 63 días | | 84 días | |
|-------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|
| | Altura (cm) | Comparativa (%) | Altura (cm) | Comparativa (%) | Altura (cm) | Comparativa (%) |
| T1: 1 | 15,70 | 51,64 | 27,20 | 39,19 | 35,40 | 40,88 |
| T2: 2 | 20,00 | 65,79 | 44,20 | 63,69 | 52,80 | 60,97 |
| T3: 3 | 22,40 | 73,68 | 45,10 | 64,99 | 63,70 | 73,56 |
| Testigo | 30,40 | 100,00 | 69,40 | 100,00 | 86,60 | 100,00 |

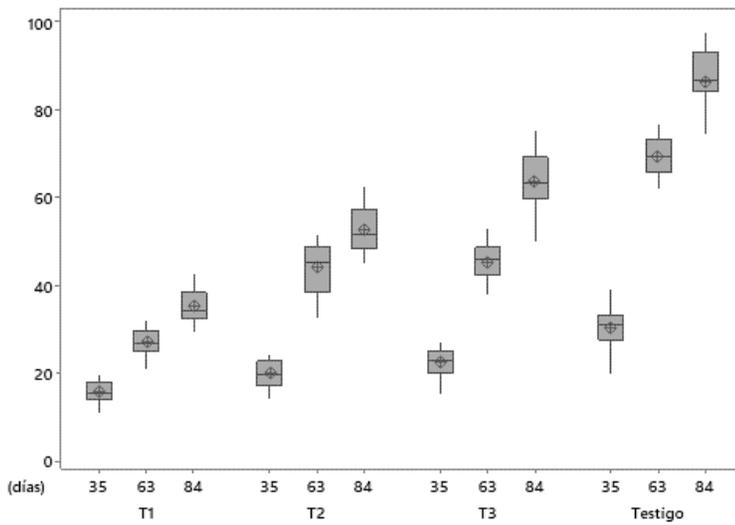


Figura 6.9. Altura del cultivo (cm)

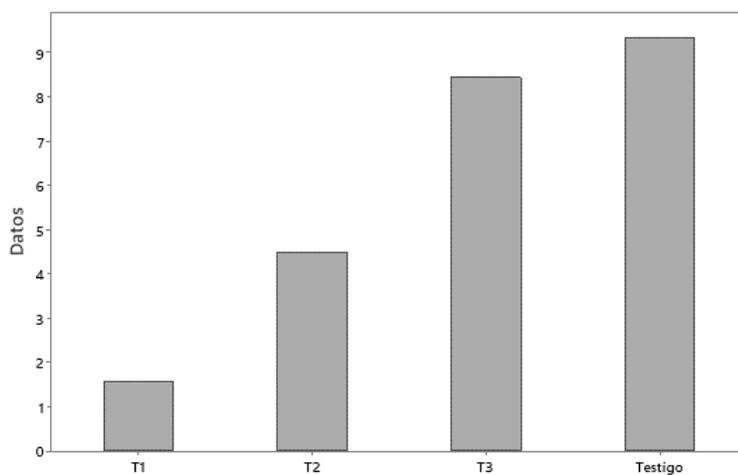
En la Figura 6.9 se muestra la tendencia del crecimiento de la planta en cada uno de los tratamientos a lo largo de los estadios. Se observa que los dos primeros meses (hasta los 63 días) la planta es donde mayor crecimiento experimenta.

6.3.3. Rendimiento del cultivo

Para el rendimiento del cultivo, se considera la cantidad de frutos cosechados (por primera vez) por planta después de los 84 días, en la siguiente (ver Tabla 6.12) se presenta el rendimiento promedio por planta de pimiento morrón aplicado a cada uno de los tratamientos; donde se tomó como comparación el testigo. Para la evaluación del rendimiento se considera el tamaño y peso del fruto. En cuanto al tamaño, debe de encontrarse entre 7-10 cm de largo; y para la segunda característica el fruto debe de estar entre los 100-150 gramos.

Tabla 6.12. Rendimiento del cultivo

| Tratamiento | Primera Cosecha | |
|----------------------|-----------------|-----------------|
| | Unidades | Rendimiento (%) |
| T1: 1 campana/planta | 1.60 | 17% |
| T2: 2 campana/planta | 4.50 | 48% |
| T3: 3 campana/planta | 8.4 | 90% |
| Testigo | 9.3 | 100% |



En la Figura 6.10 se observa que el tratamiento T3: 3 campana/planta es quien presenta un mayor rendimiento respecto al testigo. Siendo este del 90%, frente al 48 y 17% del tratamiento T2 y T1 respectivamente.

Figura 6.10. Rendimiento del cultivo (unidades)

Por lo tanto, se concluye que:

- El tratamiento T3 con 3 campanas por planta del diseño de experimento fue el más eficiente, ya que logró un 42,11% de ahorro del agua en comparación del testigo.
- En cuanto a la altura, si bien es cierto que son más pequeñas a comparación con el testigo, el rendimiento por planta fue del 90%. Por lo que se acepta al riego solar como un método de riego aceptable para esta zona.
- Cabe resaltar que durante la realización de este estudio no llovió ni una sola vez, corroborando de esta manera que es posible implementar este tipo de riego en épocas se sequía y lograra una productividad de 90%.

6.4 Eficiencia de riego con enfoque de dinámica de sistemas

Como se explica en la sección 4.3, los modelos de dinámica de sistemas en el riego y agua en la agricultura son una herramienta utilizada para analizar la gestión del agua en los sistemas agrícolas. Y la ventaja de modelar un sistema de riego es que se puede iniciar el estudio a partir de variables básicas, para luego simular los comportamientos y estudiar la dinámica. Para analizar la eficiencia de riego, el modelo de simulación propuesto para este caso de estudio (modelo de riego simple según Bala, Arshad, & Noh [93]), considera diferentes cantidades de agua y tiempo disponible para riego. Para ello se hace uso del software Vensim versión 10.0.0 [105].

Se analiza el modelo de simulación considerando diferentes cantidades de agua y tiempos disponibles de riego. Durante el diseño de experimento efectuado al sistema de riego solar se observó que para plantas pequeñas se puede dividir en intervalos específicos de 30 a 60 minutos; mientras que, para las plantas medianas y grandes se estima un tiempo de riego que varía de 30 a 90 minutos.

Las secciones 6.4.1 a 6.4.3 presentan la descripción general del sistema de riego. Las secciones 6.4.4 a 6.4.7 presentan la verificación y validación de la simulación del modelo aplicado. Finalmente, los resultados se muestran en la sección 6.4.8.

6.4.1. Diagrama de bucle causal

El diagrama de bucle causal (ver Figura 4.7) funciona sobre la base de seis variables interrelacionadas, siendo la variable área regada la que acumula todos los comportamientos, por lo que es común clasificarla como variable stock. Mientras tanto, las variables: tasa de incremento y tasa de descarte, modifican el comportamiento del área regada por lo que se clasifica como variable secundaria. Y debido a que el sistema está controlado por algunas variables como el área regada planificada, tiempo de ajuste del área regada y fracción de descarte son conocidas como elementos limitantes del sistema de riego, las cuales pueden ser establecidas o determinadas por el analista. Estas variables retroalimentan al modelo conceptual en bucles de equilibrio, ya que el modelo busca un objetivo específico que es regar el área planificada en un tiempo específico.

6.4.2. Modelo matemático

El diagrama de bucle causal está definido por un modelo matemático que representa la dinámica del sistema de riego utilizando las principales variables [93].

$$\text{Área regada} = A = \int \frac{A}{t_0} dt' = \frac{A}{t_0} t' \Big|_0^t = A \frac{t}{t_0} \quad (11)$$

$$A = \int_0^t \text{tasa de incremento} (dt) - \int_0^t \text{tasa de descarte} (dt) \quad (12)$$

$$t_0 = \text{tiempo de ajuste del área regada (unidades de tiempo)} \quad (13)$$

$$\text{Tasa de incremento} = \frac{(\text{Área planeada} - \text{Área regada})}{t_0} = \frac{A}{t_0} \quad (14)$$

$$\text{Tasa de descarte} = \text{Área regada} * \text{Fracción de descarte} \quad (15)$$

6.4.3. Diagrama de stock-flujo

Este modelo es la interpretación del diagrama de bucle causa teórico para un sistema de riego y está programado en el simulador Vensim. La simulación discutida en este trabajo reproduce y prueba cómo el cultivo está siendo regado como un sistema continuo, influenciado por eventos discretos como el tiempo de riego y el cambio de fracción de agua descartada.

El diagrama de stock-flujo (ver Figura 4.8) y el sistema de ecuaciones diferenciales representa la estructura de la retroalimentación sobre el diagrama de bucle causal para el sistema de riego [93]. El comportamiento determinado por la dinámica de la tasa de incremento y la tasa de descarte; en otras palabras, el área de riego simulada se va a regar si hay tiempo suficiente para el área planificada. Además, la otra influencia relevante en el comportamiento de la superficie regada es la cantidad de agua que se permite desechar. Este comportamiento está representado por la dinámica de la tasa de descarte y la fracción de descarte.

6.4.4. Verificación del modelo

Debido a que el cultivo es un sistema vivo, se establece dos conjuntos de parámetros; un modelo general que utiliza parámetros no relacionados, pero que representa la dinámica; y dos, el modelo de comportamiento que contiene parámetros del cultivo real y la del modelo de riego simple de Bala, Arshad y Noh. Esta doble simulación realizada es significativa para la verificación y validación del modelo conceptual, se propone datos generales sólo para verificar el comportamiento del modelo y luego utilizarlo con los parámetros reales del cultivo. Posteriormente, el modelo se validará para garantizar que los resultados lograron los objetivos de la simulación.

Las unidades de tiempo utilizadas para el modelo fueron años y horas, y el área se midió en metros cuadrados. La Tabla 6.13 presenta los parámetros programados para

este modelo de riego simulado. Es importante considerar cada uno de estos parámetros a fin de determinar si el modelo es sensible al tiempo de simulación.

Tabla 6.13. Parámetros programados para el modelo de riego

| Variables | Modelo de riego general | Unidades | Modelo de riego aplicado (Resultados) | Unidades |
|--|----------------------------|----------|---|----------------------|
| Área planeada de riego | Hectárea (ha) | 1 000 | 205 | m ² |
| Área regada | ha | 0.25 | - | m ² |
| Fracción de descarte | 1/años | 0,10 | 0,35 | 1/años |
| Tasas de descarte | ha/años | (*) | (*) | m ² /años |
| Tasa de incremento | (a/años | (**) | (**) | m ² /años |
| Tiempo de ajuste de área regada | años | 0,20 | Variable | h |
| Tiempo final | años | 1 | 3 | años |
| (*) Max (Área regada * Fracción de descarte, 0) | | | | |
| (**) Max (Área planeada de riego - Área regada / Tiempo de ajuste de área regada, 0) | | | | |

6.4.5. Validación del modelo

Se realizó pruebas para validar el modelo de riego, se incluye comparaciones gráficas y opiniones de expertos. La superficie regada para el cultivo de pimiento es de 180 m². Como se muestra en la Tabla 6.14, se presenta los resultados de la validación del modelo, en donde se usa 205 m² como parámetro del modelo de simulación y se observa cómo la tasa de descarte cambia durante diferentes tiempos de simulación. Se encontró también, que el tiempo de simulación hasta que se establezca es de tres años.

Tabla 6.14. Resultados de la validación del área y tiempo de simulación

| Configuración de área de riego planificada (m ²) | Validación del área de riego planificada | | Validación para el tiempo de simulación | |
|--|--|---------------|---|------------------|
| | (m ²) | Tasa descarte | (años) | Tasa de descarte |
| 200 | 175,63 | 43,91 | 5 | 45,55 |
| 250 | 221,00 | 55,49 | 4 | 45,55 |
| 220 | 195,00 | 48,00 | 3 | 45,50 |
| 210 | 186,43 | 46,0 | 2 | 45,05 |
| 205 | 181,96 | 45,49 | - | |

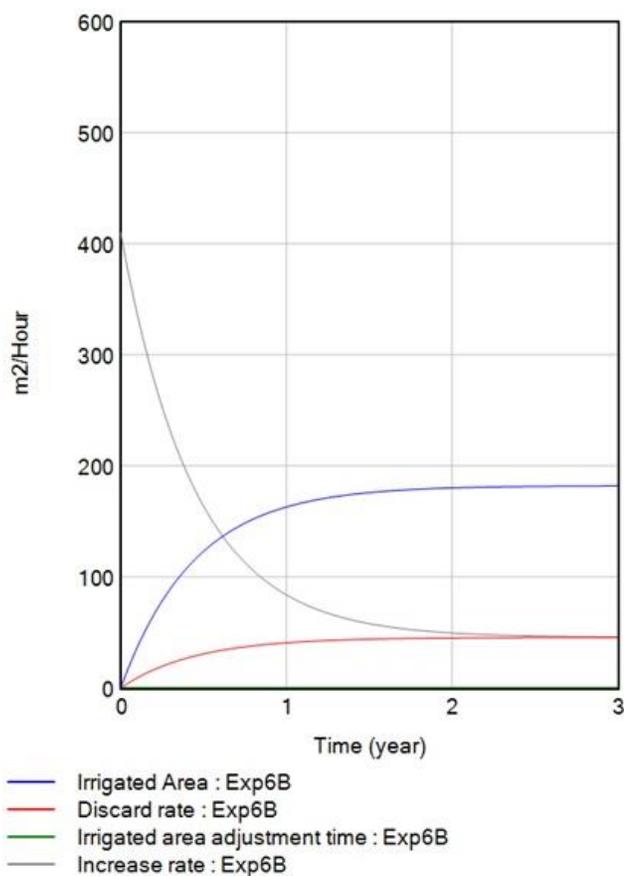


Figura 6.11. Validación del modelo

En la Figura 6.11 se muestra el comportamiento presentado en el diagrama de bucle causal es validado por la simulación en el diagrama de stock-flujo.

El proceso de verificación incluye comparar los resultados simulados con los datos reales de los experimentos realizados para el riego solar, así como, analizar la sensibilidad del modelo a diferentes parámetros de entrada.

6.4.6. Aplicación del modelo de simulación

Se decide ejecutar el modelo según el comportamiento de las plantas a lo largo de los estadios. Por lo que, se diseñan dos escenarios principales:

Escenario 1: ¿Cuál es la dinámica de sistema para las plantas pequeñas (menor a los 35 días) del cultivo de pimiento morrón?

Escenario 2: ¿Cuál es la dinámica de sistema para las plantas medianas grandes (entre los 35 y 84 días) del cultivo de pimiento morrón?

Con estos escenarios se propone 30 experimentos de simulaciones, considerando las combinaciones de los diferentes valores posibles del ajuste de tiempo para la zona de riego y la fracción de descarte en función de la técnica de riego utilizada. La simulación se realizó utilizando los siguientes supuesto:

- Las plantas pequeñas tienen un tiempo de riego más corto que una grande.
- La fracción de descarte es mayor cuando la planta es más pequeña debido a que las raíces son más cortas.
- Los cultivos se pueden regar por diferentes técnicas (por inundación, localización y riego solar), considerando la tasa de descarte como el porcentaje de agua desperdiciada por las instalaciones. Más aún, estos valores difieren entre la media de Latinoamérica como la del Perú.
- El tiempo de riego de una planta de pimiento oscila entre los 30 a 90 minutos dependiendo del tamaño.

6.4.7. Datos del modelo

Los datos para la simulación de las plantas pequeñas se presentan en la Tabla 6.15, mientras que para las plantas grandes se presentan en el Apéndice 12. Para la tasa de descarte del riego de localización se considera 0,10, mientras que para el riego por inundación un 0,25. Además, la tasa de descarte para Perú es de 0,45 según los registros y para Latinoamérica (LA) de 0,35 de agua desperdiciada. En resumen, el uso conjunto de los datos del modelo general y del diseño de experimento en específico permitió determinar con precisión los volúmenes de agua descartada al regar el cultivo en distintos momentos.

Tabla 6.15. Datos de simulación para plantas pequeñas

| Valor experimental real | Unidades | Exp 1 | Exp 2 | Exp 3 | Exp 4 | Exp 5 |
|------------------------------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| Área planeada | m ² | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| Tiempo de ajuste área regada | Horas | 0,25 | 0,50 | 1,00 | 0,05 | 1,00 |
| Tasa de descarte | 3/años | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| Tasa de descarte sostenible | Unidades | Exp 7 | Exp 8 | Exp 9 | Exp 10 | |
| Área planeada | m ² | 180 | 180 | 180 | 180 | |
| Tiempo de ajuste área regada | Horas | 0,25 | 0,50 | 1,00 | 0,05 | |
| Tasa de descarte | 3/años | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | |
| Tasa de descarte de Perú | Unidades | Exp 11 | Exp 12 | Exp 13 | Exp 14 | |
| Área planeada | m ² | 180 | 180 | 180 | 180 | |
| Tiempo de ajuste área regada | Horas | 0,25 | 0,50 | 1,00 | 0,05 | |
| Tasa de descarte | 3/años | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | |
| Tasa de descarte de LA | Unidades | Exp 15 | Exp 16 | Exp 17 | Exp 18 | |
| Área planeada | m ² | 180 | 180 | 180 | 180 | |
| Tiempo de ajuste área regada | Horas | 0,25 | 0,50 | 1,00 | 0,05 | |
| Tasa de descarte | 3/años | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | |

(*) El Exp 6 fue el experimento utilizado para la validación y verificación presentado en la sección anterior.

6.4.8. Resultados

El diseño experimental para la simulación consta de 30 experimentos que combinan el tiempo de riego y los parámetros de fracción de descarte. Las condiciones cambiantes en el modelo de simulación muestran los comportamientos adecuados para establecer un sistema de riego eficiente. El análisis de todos los experimentos se divide en dos pasos. El primer paso es la clasificación de aquellos experimentos que prometen riego de agua sostenible. El segundo paso es la observación del área regada planificada y el ajuste de tiempo para un área de riego.

Para el análisis de los resultados de la tasa de descarte; los resultados de los experimentos de simulación se clasifican bajo estos criterios: no obtener parámetros adecuados para un sistema de riego efectivo, el ajuste de tiempo para un riego, la tasa

de descarte y opciones de riego sostenibles. Además, los resultados del experimento se dan para plantas de pimiento pequeñas y grandes. En este primer paso del análisis de los resultados del experimento, se considera únicamente el comportamiento de la tasa de descarte según se visualiza en la Figura 6.12.

| | | | | |
|---------------------------------|----|--------------------------------|----------------|--------------------|
| | | Experimento Plantas grandes | | |
| | | 25 | 20 | 29 |
| Experimento Plantas pequeñas | 21 | 26 | 28 | 24 |
| | 19 | 22 | 23 | |
| | 10 | 1 | 16 | 3 |
| | 14 | 13 | 12 | 9 |
| | 4 | 18 | 7 | 8 |
| | | | 8 | 17 |
| | | No Adecuado | Posible | Sustentable |

Figura 6.12. Clasificación de resultados de simulación

La Figura 6.12 muestra que no todos los experimentos son adecuados para un sistema de riego efectivo. Los resultados clasificados como sustentables; muestran que un tiempo de riego prolongado y una fracción de descarte de agua baja significan menos desperdicio de agua. Los resultados indican que el sistema de riego es más sensible para las plantas de pimiento pequeñas que para las plantas más grandes. Además, si el objetivo es determinar mejores condiciones para reducir el desperdicio de agua, no se debe apresurar el tiempo de riego. Así, la eficiencia del sistema de riego y el agua desperdiciada en las zonas puede disminuir radicalmente.

Basándonos en los resultados, se propone realizar un análisis a partir de su dinámica en lugar de centrarse únicamente en la cantidad de agua que se puede desechar. Para el análisis de los resultados del sistema de riego, se hace uso del segundo paso del análisis del diseño experimental, que es, estudiar la dinámica que sucede cuando se usan diferentes cantidades de agua durante mucho tiempo de riego. Para esos

experimentos, todos los resultados se dividieron en resultados factibles para el tiempo de riego, el comportamiento de la tasa de descarte, y el cumplimiento del área de riego. La Tabla 6.16 clasifica los resultados obtenidos.

Tabla 6.16. Clasificación de experimento para un sistema de riego eficiente

| Experimentos para plantas pequeñas | | | |
|------------------------------------|----------|-------------------|-------------------|
| Valor experimental real | Exp 1 | Exp 2 | Exp 3 |
| Fracción de descarte sostenible | Exp 7 * | Exp 8 * | Exp 8 |
| Fracción de descarte de Perú | Exp 11 | Exp 12 | Exp 13 |
| Fracción de descarte LA | Exp 15 * | Exp 16 | Exp 17 |
| Experimentos para plantas grandes | | | |
| Valor experimental real | Exp 19 * | Exp 20 | Exp 21 |
| Fracción de descarte sostenible | Exp 22 | Exp 23 | Exp 24 |
| Fracción de descarte de Perú | Exp 25 * | Exp 26 | Exp 27 |
| Fracción de descarte LA | Exp 28 | Exp 29 | Exp 30 |
| (*) Experimentos factibles. | | | |

De la Tabla 6.16, los experimentos factibles se muestran en las celdas pintadas. Mientras que, los experimentos tachados son los que no lograron el área de riego planificado en el tiempo de riego esperado. Los experimentos que no resultaron factibles fueron 4, 10, 14 y 18.

Los resultados de la simulación muestran que el área de riego no siempre se completa cuando aumenta el tiempo de riego. Además, no todos los parámetros de tiempo de ajuste de riego son factibles para cada fracción de descarte. Por ejemplo, si el sistema permite que se descarte más agua por ejemplo de 0,45 o 0,35; entonces, no se podrá completar el área de riego, incluso si se aumentara el tiempo de riego. En otras palabras, el incremento de tiempo es solo por el agua desperdiciada y no significa que el sistema de riego sea más eficiente.

Los experimentos de la simulación mostraron que, el comportamiento del sistema de riego no es igual al valor experimental real de la fracción de descarte y el parámetro sostenible. A pesar de la expectativa del sistema de riego sería más eficiente cuanto mayor sea el tiempo de riego, los resultados de la simulación arrojan que puede ser contradictorio. En específico, los experimentos 25 y 26 muestran que, si el objetivo de

gastar menos agua en el cultivo no es suficiente, se incrementa el tiempo de riego. Esa estrategia solo permite desperdiciar una mayor cantidad de agua. Esto sucede porque el tiempo de ajuste del riego no es una variable que mejore la eficiencia de un sistema de riego, utilizando una alta fracción de descarte. Más bien, según el experimento 23, un valor más bajo de la fracción de descarte puede mejorar la eficiencia.

Las gráficas de los resultados de la simulación se muestran en el Apéndice 13.

6.5 Propuestas de mejora

Aunque los agricultores en Perú no cuentan con recursos económicos, se puede proponer un sistema de riego eficiente como el riego solar, y a través del análisis de la dinámica sistemas, se puede tomar decisiones informadas en cual permite considerar el comportamiento y la interacción de las variables involucradas. Se ha comprobado que la forma de regar los cultivos puede generar mejores cosechas y mayores ingresos, sabiendo que el vital líquido es un recurso cada vez más escaso, del cual hay que hacer el mejor uso posible.

6.5.1. Tecnificar el sistema de riego

Con los resultados obtenidos en la simulación, se concluye que, para conseguir una tasa de descarte sostenible a través de una fracción de descarte adecuada, es necesario un sistema de riego tecnificado. En otras palabras, para lograr una mayor eficiencia en el riego (reducir el desperdicio de agua en los cultivos), es necesario invertir en infraestructura. Sin embargo, no se puede llamar eficiente a un sistema de riego sólo por la cantidad de agua desechada o desperdiciada (fracción de descarte) ya que también tenemos que tomarnos el tiempo necesario para regar toda la superficie de cultivo regada.

En la Tabla 6.17 se presenta las posibles cantidades de agua que se utilizaría entre los 15 y 30 primeros minutos de riego con y sin simulación. En donde se observa que tecnificando el sistema de riego se lograría un mayor ahorro de agua. El riego por localización es la mejor opción de riego a un futuro. Debido a que consiste en suministrar el agua de modo que moje una parte del suelo del cultivo, en donde se recomendaría un suministro frecuente de agua y en cantidades relativamente pequeña.

Tabla 6.17. Valores posibles para el cultivo entre 15 y 30 minutos de riego

| Uso de agua para experimentos para plantas pequeñas | Sin simulación | Con simulación |
|---|----------------|----------------|
| Riego solar | 5,50 L | 2,50 L |
| Riego localizado | 2,20 L | 1,00 L |
| Riego por inundación | 9,90 L | 4,50 L |
| Uso de agua para experimentos para plantas grandes | Sin simulación | Con simulación |
| Riego solar | 3,80 L | 2,20 L |
| Riego localizado | 2,16 L | 1,15 L |
| Riego por inundación | 10,80 L | 4,00 L |

Si bien es cierto, implementar este sistema de riego a futuro sería costoso, existe una forma de optimizarlo.

6.5.2. Diseño y configuración de riego localizado

El riego localizado puede ser visualizado como un grafo, específicamente como una arborescencia. Ya que tiene un nodo origen (suministro de agua) y un nodo final (desfogue de agua) y las aristas vendría a ser las tuberías de agua. Por lo que, el objetivo es instalar las tuberías a menor distancia y regar la mayor cantidad de plantas, teniendo en cuenta que, a menor distancia, menor será el costo de instalación. En la Figura 6.13 se representa un sistema de riego localizado.

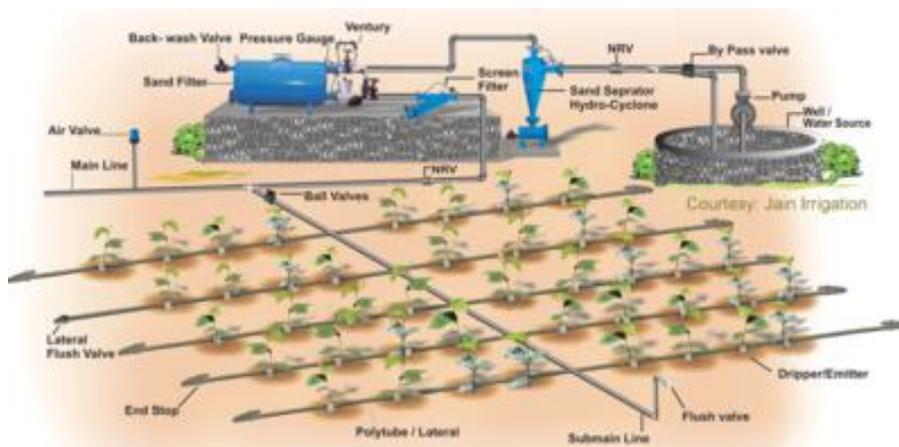


Figura 6.13. Sistema de riego localizado propuesto

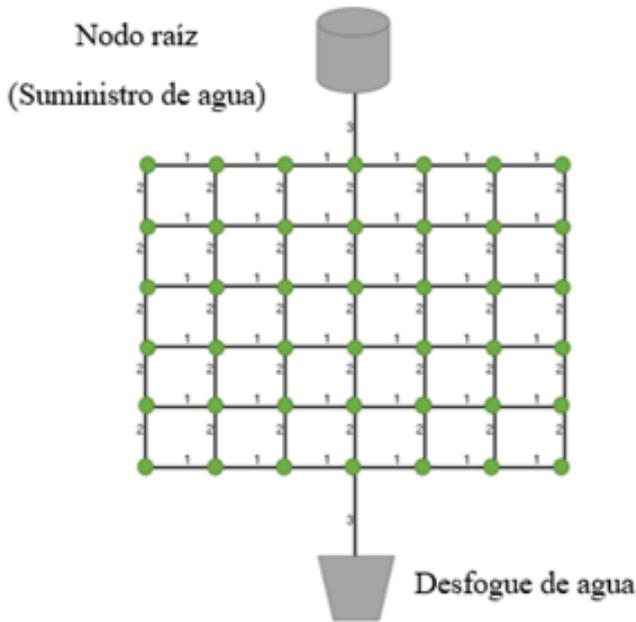


Figura 6.14. Grafo de arborescencia

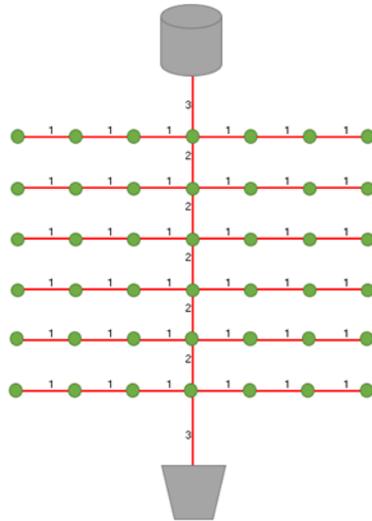


Figura 6.15. Grafo de arborescencia de ruta más corta

Graficando la estructura del riego localizado presentado en la Figura 6.14, se obtiene el grafo de arborescencia, el cual tiene una distancia total de 112 metros (m) de tuberías si se llegara a conectar con todas las plantas.

Con el fin de obtener la menor distancia, se propone utilizar la arborescencia de la ruta más corta.

Utilizando el algoritmo de Dijkstra se encuentra la solución. En la Figura 6.15 se muestra la solución del grafo. En donde se observa que se podría reducir un 54% de metros de tubería.

Cabe recalcar que esta configuración propuesta es para el experimento realizado y para otro cultivo se tendría que hacer su propio grafo y configuración

Otra forma de optimizar y generar ahorros es integrando la red de riego. Para este caso, se toma en cuenta a los terrenos como nodos, y las tuberías como arcos de conexión entre ellas. En la Figura 6.16, se presenta el grafo de la red de riego. En donde, se necesitaría 1 892 m de tuberías con esta configuración.

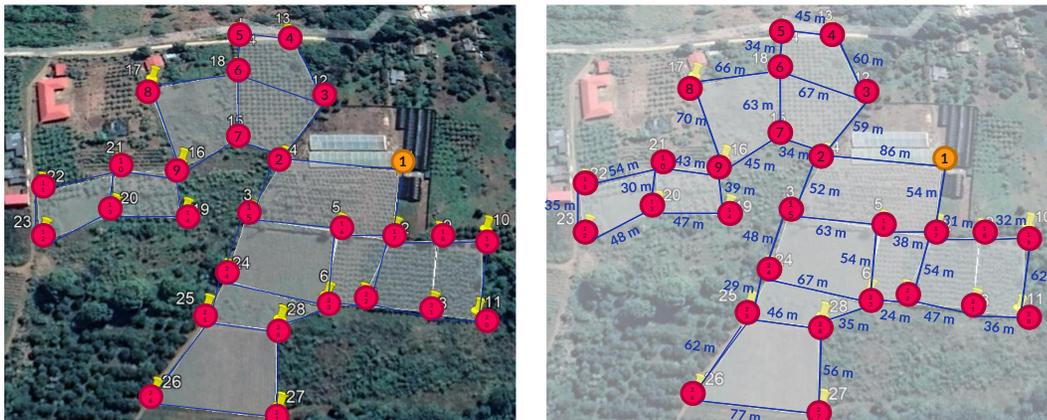


Figura 6.16. Red de integración de riego

Sin embargo, utilizando el algoritmo del árbol de expansión mínima se podría reducir la distancia a 4 360 m, representando un ahorro del 36,63% (ver Figura 6.17).

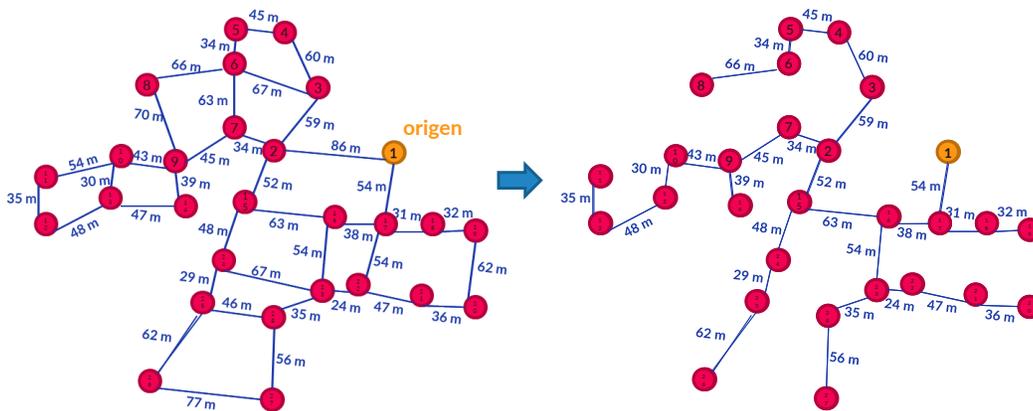


Figura 6.17. Grafo de árbol de expansión mínima

En conclusión, se utiliza la teoría de redes para evaluar el impacto económico, ya que, a menor metraje de tuberías, menor será el costo. Para los agricultores, podría servirles como una herramienta de análisis y decisión; por ejemplo, si deciden adicionar o eliminar canales de riego o conectar redes de riego. Esto puede ayudar a los agricultores a tomar decisiones informadas sobre cómo mejorar y expandir la infraestructura de riego para maximizar su eficiencia y reducir los costos.

7 Conclusiones y discusiones

En resumen, el estudio demuestra que el riego solar reduce significativamente el consumo de agua en los cultivos de pimiento morrón. La integración de múltiples enfoques en este trabajo ha proporcionado una perspectiva completa sobre el riego solar y la gestión del agua en la agricultura familiar peruana. Los resultados del diseño de experimentos respaldan la implementación del riego solar como una solución viable y rentable para las familias de agricultores en este país. Además, la dinámica de sistemas ha demostrado ser una herramienta valiosa para analizar el consumo de agua y ha arrojado luz sobre las áreas críticas para mejorar la eficiencia en el contexto específico de Perú tales como tiempo de riego y desperdicio de agua, por ejemplo.

La toma de decisiones orientada a tecnificar el sistema de riego es un paso importante hacia la sostenibilidad en la agricultura familiar en Perú. Sin embargo, se debe enfatizar que esta transición requiere una inversión inicial, y se necesita una planificación cuidadosa para garantizar que los agricultores tengan acceso a las tecnologías y recursos necesarios, considerando las condiciones económicas y geográficas del país. La teoría de redes ha demostrado su utilidad al optimizar el riego tecnificado, lo que podría generar ahorros significativos en términos de costo y uso de recursos, particularmente en el contexto peruano. Esta metodología podría extenderse para abordar problemas específicos relacionados con la distribución y gestión del agua en el país, contribuyendo a la seguridad alimentaria y al desarrollo sostenible de las comunidades agrícolas en Perú.

El presente estudio abre la puerta a una serie de posibles trabajos futuros que podrían beneficiar aún más a las familias de agricultores en este país. Uno de los aspectos clave sería la implementación práctica del riego tecnificado en comunidades agrícolas específicas en Perú, lo que requeriría una investigación aplicada y colaboraciones estrechas con agricultores locales. Además, sería beneficioso explorar aún más la dinámica de sistemas en la gestión del agua en el contexto peruano, incluida la adaptación a diferentes cultivos y condiciones climáticas regionales. Esto podría llevar a estrategias de riego más personalizadas y eficientes, considerando las variaciones geográficas y climáticas en el país. En última instancia, esta investigación sienta las bases para futuros proyectos interdisciplinarios en Perú que aborden la seguridad alimentaria, la sostenibilidad y la gestión eficiente del agua en la agricultura familiar, lo que podría tener un impacto significativo en las comunidades agrícolas de este país sudamericano.

8 Referencias

- [1] L. Castilleja Vargas, P. Gutiérrez Juárez, L. F. Laura y L. F. Serrudo, «Apostar por la agricultura para lograr una diversificación productiva,» Banco Interamericano de Desarrollo, 2023.
- [2] Instituto Nacional de Estadística e Informática, *Encuesta Nacional Agropecuaria 2022*, Lima: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022.
- [3] Autoridad Nacional del Agua, «Estrategia nacional de lucha contra la desertificación y la sequía 2016-2030,» Lima, 2016.
- [4] J. Santa Cruz, M. Burneo y P. Quiñones, «Cambio climático y los impactos diferenciados que tiene las mujeres en dos microcuencas de la región Junín,» Fomento de la Vida - FOVIDA, Lima, 2022.
- [5] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, «Programa Nacional de Riego Tecnificado para una agricultura climáticamente resiliente,» Programa Subsectorial de Irrigaciones, Lima, 2022.
- [6] P. Saldaña Mínguez, «Diseño de una instalación de riego solar,» Escuela de Ingenierías Industriales - Universidad de Valladolid, 2022.
- [7] Twenergy, «Riego solar, casero y ecológico: kondenskompressor,» Ecología y Reciclaje, 2015.
- [8] Novagric, «Sistema de Riego Solar,» 2014.
- [9] EcoInventos, «Sistema de riego por goteo solar con botellas de plástico,» Green Technology, 2022.
- [10] J. A. Sagardoy, «La gestión del agua para la agricultura,» III Conferencia de Desarrollo Agropecuario, Madrid, 2020.
- [11] Naciones Unidas, «Agua y desarrollo sostenible,» Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, 2016.
- [12] Banco Mundial, «El agua en la agricultura,» World Bank Group Water Global, 2022.
- [13] C. Betancourt, T. Tartabull y Y. Labaut, «El manejo integrado del agua en la agricultura: necesidad de implementación y aspectos vinculados,» *Revista Científica Agroecosistemas*, vol. 5, n° 2, pp. 40-54, 2017.
- [14] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, «La transformación agrícola empieza en el patio trasero,» FAO, Nissa, 2021.
- [15] A. Giriraj, P. Malik y A. Taron, «Scaling up Index-based Flood Insurance (IBFI) for agricultural resilience and flood-proofing livelihoods in developing countries,» International Water Management Institute (IWMI), Colombo, 2021.
- [16] Food and Agriculture Organisation and UN Water, «Progress on change in water-use efficiency: Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.4.1,» Roma, 2021.
- [17] CropLife International, «Water Matters for Sustainable Agriculture: A collection of case studies,» University of Cape Town, Johannesburg, 2004.
- [18] E. Hermann y E. Prunes, «¿Qué es el agua subterránea y por qué es tan importante?,» WWF-México, 2022.

- [19] W. Ojeda, L. Hernández y I. Sánchez, Requerimientos de riego de los cultivos, Ciudad de México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 15-48.
- [20] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, «Afrontar la escasez de agua: Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria,» Italian Development Cooperation, Roma, 2013.
- [21] R. Morales, G. Ruiz y S. Alejo, «Impact of Automatization of Irrigation: Case Study,» International Journal of Computing Science and Applications, Ciudad de México, 2020.
- [22] F. Juárez, «Ahorrar tiempo, dinero y agua con prácticas sustentables,» Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, Ciudad de México, 2022.
- [23] Banco Santander, «¿Cómo hacer un uso más eficiente del agua en la agricultura?,» Ciudad de México, 2023.
- [24] M. Martínez Guzman, «Tecnologías para el uso sostenible del agua,» Global Water Partnership Central America, Tegucigalpa, 2013.
- [25] iAgua, «¿Qué es la Huella Hídrica? ¿Para qué sirve?,» Redacción iAgua, 2016.
- [26] Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, «Innovación y gestión del agua para el desarrollo sostenible en la agricultura,» Dirección General del IICA ante la Junta Interamericana de Agricultura (JIA), San José, 2015.
- [27] Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, «Cálculo de huella hídrica: Aplicaciones para el sector agropecuario de América Latina,» San José, 2018.
- [28] R. Salazar, A. Rojano y I. López, «La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada,» *Tecnología y Ciencia del Agua*, vol. 5, nº 2, pp. 177-183, 2014.
- [29] Instituto Nacional de Tecnología Agropecuarias, «Gestionar el agua de riego para aumentar la eficiencia y la productividad,» Departamento General de Irrigación, Mendoza, 2022.
- [30] Centro de Información de Recursos Naturales, «Análisis de la evolución del sistema de riego en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins en el período comprendido entre los catastros frutícolas Odepa-Ciren de los años 2018 y 2021,» Comisión Nacional de Riego, O'Higgins, 2022.
- [31] Comisión Nacional del Agua, «Cuatro años de retos y avances en la gestión del agua,» Gobierno de México, 2022.
- [32] Autoridad Nacional del Agua, «Plan operativo institucional 2022 - Tomo II,» Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, Lima, 2022.
- [33] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, «The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Managing systems at risk,» Earthscan, Madrid, 2021.
- [34] A. Merea, El IICA y el riego por goteo en América Latina y el Caribe, San José: Instituto Iberoamericano de la Cooperación para la Agricultura , 1982.
- [35] Programa de Formación Agraria y de Apoyo al Emprendimiento Juvenil en el Perú, «Sistema de riego para la agricultura familiar,» Instituto de Desarrollo y Medio Ambiente, Lima, 2020.
- [36] Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, Fundamentos y diseño de sistemas de riego, Santiago: Biblioteca CIREN, 1985.
- [37] iAgua, «¿Cuántos tipos de riego hay?,» 2018.

- [38] J. León-Ruiz, J. Silva-Orozco, P. Tacle-Humanante y C. Lema-Asitimbay, «Diseño y aplicación del método de riego por gravedad,» *Polo del Conocimiento*, vol. 7, n° 9, pp. 1542-1552, 2022.
- [39] J. Jara R. y E. Holzapfel H., «Riego presuarizado,» Facultad de Ingeniería Agrícola - Universidad de Concepción, 2018.
- [40] J. Valverde Cornejo, «Sistema de riego por goteo,» Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, San José, 2022.
- [41] Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, «Existen diferentes sistemas de riego en la agricultura,» Gobierno de México, Ciudad de México, 2016.
- [42] V. Lazarova y A. Bahri, «Water reuse practices for agriculture,» *International Water Management Institute, Scientific and Technical Report 20*, pp. 199-227, 2018.
- [43] J. Carrazón, «Manual práctico para el diseño de sistemas de riego,» *Programa Especial para la Seguridad Alimentaria*, pp. 15-26, 2017.
- [44] Fundación del Agua, «Tipos de sistema de riego y sus características,» *Aquae*, Madrid, 2022.
- [45] J. Zúñiga Morgan, «El programa subsectorial de irrigaciones y la tecnificación del riego en el Perú,» Ministerio de Agricultura, Lima, 2019.
- [46] R. Cruz Guzmán, «Plan integral de riego tecnificado por aspersión,» Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, 2023.
- [47] J. Martín, «Sistema de riego capilar con cordón para huerto urbano,» Santiago Chile, 2018.
- [48] S. Sommantico, «Riego por goteo: propuestas y beneficios de armar un sistema propio,» Infocampo, Argentina, 2018.
- [49] A. Diaz-Pinto, «Descubre la técnica del goteo solar para ahorrar y filtrar agua en los cultivos,» *Econoinventos*, 2018.
- [50] X. Espinoza-Barraza, «Método del riego por condensación solar para la mitigación del estrés hídrico en biohuertos escolares Lima,» Escuela de Ingeniería Ambiental - Universidad César Vallejo, Lima, 2018.
- [51] J. Sánchez Sánchez, R. Ortega Oller, M. Hervás Muñoz, F. Padilla Ruis y F. Pugnaire de Idaola, «Micro riego una técnica de restauración de la cubierta vegetal para ambientes semiáridos,» Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, Almería, 2014.
- [52] Naciones Unidas, «Gestión integrada de los recursos hídricos en favor de la seguridad alimentaria y la resiliencia al cambio climático,» División de Tierras y Aguas, Roma, 2022.
- [53] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, «El reto: una agricultura sustentable, productiva e inclusiva,» Gobierno de México, 2019.
- [54] Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, «Iniciativa hemisférica de agua y agricultura,» San José, 2023.
- [55] I. Sanchez Cohen, «Requerimientos de riego de los cultivos,» Comisión Nacional del agua, Ciudad de México, 2014.
- [56] M. Ortega Leyva, «Una mirada a los plásticos en la agricultura de México,» *Plastics Technology México*, Ciudad de México, 2021.
- [57] Grupo Quimisor, «Usos y ventajas del plástico en la agricultura,» *Sustentabilidad*, 2020.

- [58] Autoridad Nacional del Agua, «Las condiciones de sequía y estrategias de gestión en el Perú,» Centro Peruano de Estudios Sociales, Lima, 2021.
- [59] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, «Aprovechamiento de los recursos hídricos para uso agrario,» Lima, 2017.
- [60] Sistema de Información Agroclimática para el Regadío, «Evapotranspiración,» Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, 2018.
- [61] iAgua, «El regadío en Perú,» 2021.
- [62] Autoridad Nacional del Agua, «Plan Nacional de Recursos Hídricos,» Lima, 2021.
- [63] K. Chartzoulakisa y M. Bertaki, «Sustainable Water Management in Agriculture under Climate Change,» *Science Direct: Agriculture and Agricultural Science Procedia*, pp. 88-98, 2015.
- [64] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, «¡Agricultura Familiar!,» Lima, 2021.
- [65] ANPE Perú, «Del campo a la mesa: la importancia de la agricultura familiar en el Perú,» Lima, 2023.
- [66] M. Carmagnani, «La agricultura familiar en América Latina,» *Problemas del desarrollo*, vol. 39, nº 153, 2008.
- [67] Programa de Agricultura Sostenible en Laderas de América Central, «Riego por goteo con botellas plásticas,» Guía Técnica, Nicaragua, 2018.
- [68] Instituto Nacional de Tecnologías Agropecuarias, «Sistema de Riego por Goteo con Botellas Plásticas,» Buenos Aires, 2015.
- [69] S. Amaguaña Galarza y C. Llamba Toapanta, «Diseño e implementación de la fase inicial de un sistema de manejo sustentable para suelo y agua en el sector sur oeste de la UPS,» Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2013.
- [70] J. León Carrasco, «Riego por goteo representa casi el 90% de los sistemas de riego tecnificado que se instalan en Perú,» Agraria, Lima, 2022.
- [71] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, «Escasez de agua: Uno de los mayores retos de nuestro tiempo,» 2019.
- [72] C. Del Pozo, «Estimación de la relación entre el acceso a infraestructura de riego y la productividad de unidades agrícolas en el Perú,» Ministerio de Agricultura y Riego, Lima, 2019.
- [73] Ministerio de Agricultura y Riego, «Programa de riego tecnificado,» Programa Subsectorial de Irrigaciones, Lima, 2018.
- [74] Ministerio de Agricultura y Riego, «Política y estrategia nacional de riego en el Perú,» Gobierno del Perú, Lima, 2013.
- [75] H. Delgado Súmar, La irrigación "moderna" en el Perú, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 1996.
- [76] Intagri, «Riego por Goteo: Fundamentos para un Diseño Eficiente del Sistema,» Portal Frutícola, Santiago de Chile, 2016.
- [77] D. Montgomery C., Diseño y análisis de experimento, México, D.F.: Editorial Limusa, S.A. de C.V., 2004.

- [78] G. Box, W. Hunter y J. Hunter, *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*, 2 ed., John Wiley & Sons, 2005.
- [79] H. Gutiérrez y R. De la Vara, *Análisis y diseño de experimentos*, México D.F.: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V., 2008.
- [80] J. A. Bondy y U. S. R. Murty, *Graph theory*, Springer Science & Business Media, 2008.
- [81] R. T. Rockafellar, *Network Flows and Monotropic Optimization*, New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [82] F. Hillier, *Introducción a la investigación de operaciones*, 9 ed., McGraw-Hill, 2010.
- [83] G. R. Agnarsson., *Graph Theory: Modeling, Applications, and Algorithms*, Pearson, 2007.
- [84] R. E. Tarjan, *Data Structures and Network Algorithms*, vol. New Jersey, Philadelphia: Bell Laboratories, 1983, pp. 12-14.
- [85] Smart Solutions, «Sistemas de riego,» *Tecnología, sustentabilidad y ambientes de riego*, Ciudad de México, 2020.
- [86] R. Calderón y O. Vázquez, «Sistemas de riego,» *Mexiriego*, Ciudad de México, 2019.
- [87] G. Sela, «Principios del diseño de sistemas de riego,» *Cropaia*, Madrid, 2021.
- [88] P. Ruiz Rodríguez, «Continual improvement as a tool for project management,» *Universidad de Cantabria*, Santander, 2014.
- [89] J. Sterman y H. Rahmandad, *Introduction to System Dynamics*, Sloan School of Management, 2013.
- [90] B. Candelaria Martínez, O. Ruiz Rosado, F. Gallardo López, P. Pérez Hernández, Á. Martínez Becerra y L. Vargas Villamil, «Application of simulation models in agricultural research and planning, a review,» *Tropical and subtropical agroecosystems*, vol. 14, pp. 999-1010, 2011.
- [91] R. Hamid, A. Rouhollah, S. Abdalrahim y R. Barati, «Water Management Using System Dynamics Modeling in Semi-arid Regions,» *Civil Engineering Journal*, vol. 3, n° 9, pp. 766-778, 2017.
- [92] B. Chunga, W. Marx, X. Cai, W. Cleacq, A. Watson y M. Malota, «Water allocation using system dynamic modelling in the aquaculture integrated with small-scale irrigation systems in Malawi,» *Science Direct*, vol. 129, 2022.
- [93] B. K. Bala, F. M. Arshad y K. M. Noh, *System Dynamics: Modelling and Simulation*, Malaysia: Springer, 2018, pp. 21-24.
- [94] J. Forrester, *Principles of System Dynamics*, Chicago: Productivity Press, 1988.
- [95] S. Razavi, K. Madani y M. H. Afshar, *Dynamic simulation of irrigation efficiency in surface irrigation systems*, *Agricultural Water Management*, 2014, pp. 146, 223-233.
- [96] B. M. Alobaidi, K. Madani y O. M. Rouhani, *Improving irrigation water-use efficiency using system dynamics approach*, *Agricultural Water Management*, 2019, pp. 217, 37-45.
- [97] D. Dudenhoefer, «A medida que crece la producción agrícola en el Perú, los pequeños agricultores ansían mejores mercados,» *Banco Mundial*, Lima, 2018.
- [98] Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial, «Tomando impulso en la agricultura peruana,» *Grupo Banco Mundial*, Washington DC, 2017.

- [99] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, «Boletín Agroclimático del Capsicum,» Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología , Lambayeque, 2020.
- [100] Agraria, «Exportaciones peruanas de pimiento morrón crecen 34% en volumen y 52% en valor entre enero y agosto,» Fresh Fruit, Lima, 2022.
- [101] S. Moreno Llacza y C. Verde Bejarano, «Producción de Pimiento Morrón en sistema de casa Malla en condiciones de la Costa Norte del Perú,» Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú, 2022.
- [102] G. Fornaris, «Conjunto Tecnológico para la Producción de Pimiento,» Colegio de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Puerto Rico, San José, 2005.
- [103] Infoagro Systems, «El cultivo del pimiento,» Agri Nova Science, 2018.
- [104] Minitab, «LLC,» <https://www.minitab.com>, 2021.
- [105] Vensim, «Software,» Ventana Systems Inc, <https://vensim.com/>, 2022.
- [106] C. Berge, The Theory of Graphs and its application, Paris: Dunod Paris, 1958.
- [107] D. Dudenhoefer, «A medida que crece la producción agrícola en el Perú, los pequeños agricultores ansían mejores mercados,» Banco Mundial, Lima, 2018.

Apéndice 1. Diseño de experimento

Los pasos por seguir para planificar y efectuar un diseño de experimento son los siguientes [77] [78] [79]:

- 1 **Definir los objetivos del experimento:** Se debe hacer una lista completa de las preguntas concretas a las que debe dar respuesta el experimento. Es importante indicar solamente cuestiones fundamentales ya que tratar de abordar problemas colaterales pueden complicar innecesariamente el experimento. Una vez elaborada la lista de objetivos, puede ser útil esquematizar el tipo de conclusiones que se espera obtener en el posterior análisis de datos.
- 2 **Identificar todas las posibles fuentes de variación:** Una fuente de variación es cualquier cosa que pueda generar variabilidad en la respuesta. Es recomendable hacer una lista de todas las posibles fuentes de variación del problema, distinguiendo aquellas que, a priori, generarán una mayor variabilidad. Se distinguen dos tipos. Factores tratamiento, son aquellas fuentes cuyo efecto sobre la respuesta es de particular interés para el experimentador. Factores nuisance, son aquellas fuentes que no son de interés directo pero que se contemplan en el diseño para reducir la variabilidad no planificada.
- 3 **Elegir una regla de asignación de las unidades experimentales a las condiciones de estudio (tratamientos):** La regla de asignación o diseño experimenta especifica que unidades experimentales se observarán bajo cada tratamiento. Hay diferentes posibilidades: diseño factorial o no, anidamiento, asignación al azar en determinados niveles de observación, el orden de asignación, etc.
- 4 **Especificar las medidas que se realizarán (la respuesta), el procedimiento experimental y anticiparse a las posibles dificultades:** Variable respuesta o variable de interés. Los datos que se recogen en un experimento son medidas de una variable denominada variable respuesta o variable de interés. Es importante precisar de antemano cuál es la variable respuesta y en qué unidades se mide. Naturalmente, la respuesta está condicionada por los objetivos del experimento.

A menudo aparecen dificultades imprevistas en la toma de datos. Es conveniente anticiparse a estos imprevistos pensando detenidamente en los

problemas que se pueden presentar o ejecutando un pequeño experimento piloto. Enumerar estos problemas permite en ocasiones descubrir nuevas fuentes de variación o simplificar el procedimiento experimental antes de comenzar. También se debe especificar con claridad la forma en que se realizarán las mediciones: instrumentos de medida, tiempo en el que se harán las mediciones, etc.

5 Ejecutar un experimento piloto: Un experimento piloto es un experimento que utiliza un número pequeño de observaciones. El objetivo de su ejecución es ayudar a completar y chequear la lista de acciones a realizar. Las ventajas que proporcionan la realización de un pequeño experimento piloto son: permite practicar la técnica experimental elegida e identificar problemas no esperados en el proceso de recogida de datos, si el experimento pilote tiene tamaño suficientemente grande puede ayudar a seleccionar un modelo adecuado al experimento principal y los errores experimentales observados en el experimento principal.

6 Especificar el modelo: El modelo matemático especificado debe indicar la relación que se supone que existe entre la variable respuesta y las principales fuentes de variación identificadas en el paso 2. Es fundamental que el modelo elegido se ajuste a la realidad con la mayor precisión posible. El modelo más habitual es el modelo lineal es la siguiente ecuación:

$$Y = \sum_{i=1}^k \alpha_i + \varepsilon$$

En este modelo la respuesta viene dada por una combinación lineal de términos que representan las principales fuentes de variación planificada más un término residual debido a las fuentes de variación no planificada. Los modelos que se estudian en este texto se ajustan a esta forma general.

El experimento piloto puede ayudar a comprobar si el modelo se ajusta razonablemente bien a la realidad. Los modelos de diseño de experimentos, según sean los factores incluidos en el mismo, se pueden clasificar en: modelo de efectos fijos, modelo de efectos aleatorios y modelos mixtos.

7 Esquematizar los pasos del análisis estadístico: El análisis estadístico para realizar depende de los objetivos indicados en el paso 1, el diseño seleccionado en

el paso 3 y el modelo asociado que se especificó en el paso 5. Se deben esquematizar los pasos del análisis a realizar que deben incluir: estimaciones que hay que calcular, contraste a realizar, intervalos de confianza que se calcularán y diagnosis y crítica del grado de ajuste del modelo a la realidad.

- 8 **Determinar el tamaño muestral:** Calcular el número de observaciones que se deben tomar para alcanzar los objetivos del experimento. Existen, dependiendo del modelo, algunas fórmulas para determinar este tamaño. Todas ellas sin embargo requieren el conocimiento del tamaño de la variabilidad no planificada (no sistemática y sistemática, si es el caso) y estimarlo a priori no es fácil, siendo aconsejable sobreestimarla. Normalmente se estima a partir del experimento piloto y en base a experiencias previas en trabajos con diseños experimentales semejantes.
- 9 **Revisar las decisiones anteriores (modificar si es necesario):** De todas las etapas enumeradas, el proceso de recogida de datos suele ser la tarea que mayor tiempo consume, pero es importante realizar una planificación previa, detallando los pasos anteriores, lo que garantizará que los datos sean utilizados de la forma más eficiente posible. Es fundamental tener en cuenta que:
 - Ningún método de análisis estadístico, por sofisticado que sea, permite extraer conclusiones correctas en un diseño de experimentos mal planificado. Recíprocamente, debe quedar claro que el análisis estadístico es una etapa más que está completamente integrado en el proceso de planificación.
 - El análisis estadístico no es un segundo paso independiente de la tarea de planificación. Es necesario comprender la totalidad de objetivos propuestos antes de comenzar con el análisis. Si no se hace así, tratar que el experimento responda a otras cuestiones a posteriori puede ser (lo será casi siempre) imposible. Pero no sólo los objetivos están presentes al inicio del análisis sino también la técnica experimental empleada.
 - No invertir nunca todo el presupuesto en un primer conjunto de experimentos y utilizar en su diseño toda la información previa disponible.

- Toda persona implicada en la ejecución del experimento y en la recolección de los datos debe ser informada con precisión de la estrategia experimental diseñada.

Los pasos del listado anterior no son independientes y en un determinado momento puede ser necesario volver atrás y modificar decisiones tomadas en algún paso previo. Sólo después de haber tomado estas decisiones se procederá a realizar el experimento.

Apéndice 2. Materiales y esquema operativo del proyecto

| N° | Materiales | |
|----|--|--|
| 1 | Botella interna pequeña 1L |  |
| 2 | Botella externa grande 3L | |
| 3 | Botella externa grande 7L | |
| 4 | Cinta métrica |  |
| 5 | Plántulas de pimiento morrón: Se denomina plántula a la planta en sus primeros estadios de desarrollo, desde que germina hasta que se desarrollan las primeras hojas verdaderas. |  |
| 6 | Termohigrómetro: Instrumento que mide y muestra la temperatura y humedad relativa del ambiente. |  |

El esquema operativo del riego solar es el siguiente:

Campana de 3L



Campana de 7L



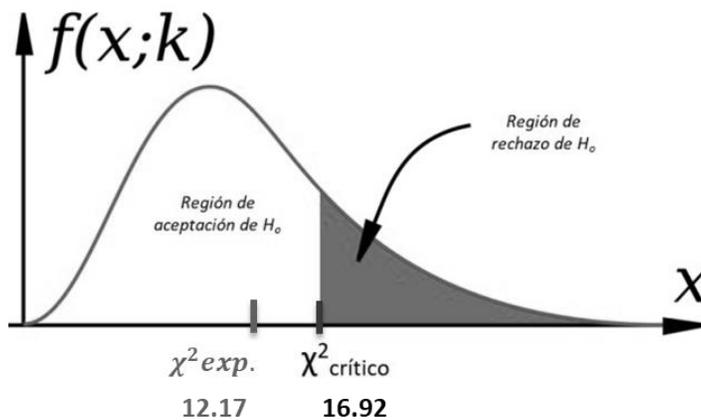
Apéndice 3. Prueba de independencia de la campana de 3L y 7L

| Tipo de campana | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| De 3L | 329 | 374 | 389 | 395 | 352 | 350 | 358 | 326 | 325 | 413 |
| De 7L | 395 | 418 | 365 | 451 | 376 | 341 | 383 | 385 | 369 | 490 |

Valores en cl/planta semanal

Prueba de independencia χ^2 : La prueba de independencia de ji cuadrado (χ^2) es una prueba estadística de hipótesis que se usa para determinar si dos variables categóricas o nominales pueden estar o no relacionadas [77]. A continuación, se procede a validar la independencia de los datos:

- H_0 Los datos de la campana de 3L y 7L son independientes
- H_1 Los datos no son independientes



Según la gráfica, se obtiene que el estadístico χ^2 del experimento es menor al χ^2 crítico; por lo que se acepta la hipótesis nula H_0 . Por lo que, se concluye que los datos son independientes.

Prueba de independencia ji cuadrado

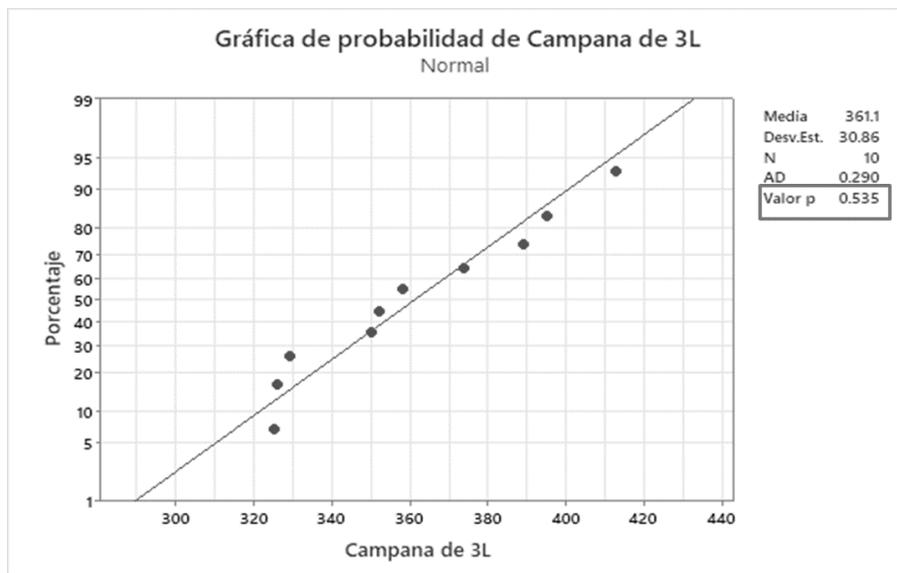
Apéndice 4. Prueba de normalidad de la campana de 3L y 7L

| Tipo de campana | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| De 3L | 329 | 374 | 389 | 395 | 352 | 350 | 358 | 326 | 325 | 413 |
| De 7L | 395 | 418 | 365 | 451 | 376 | 341 | 383 | 385 | 369 | 490 |

Valores en cl/planta semanal

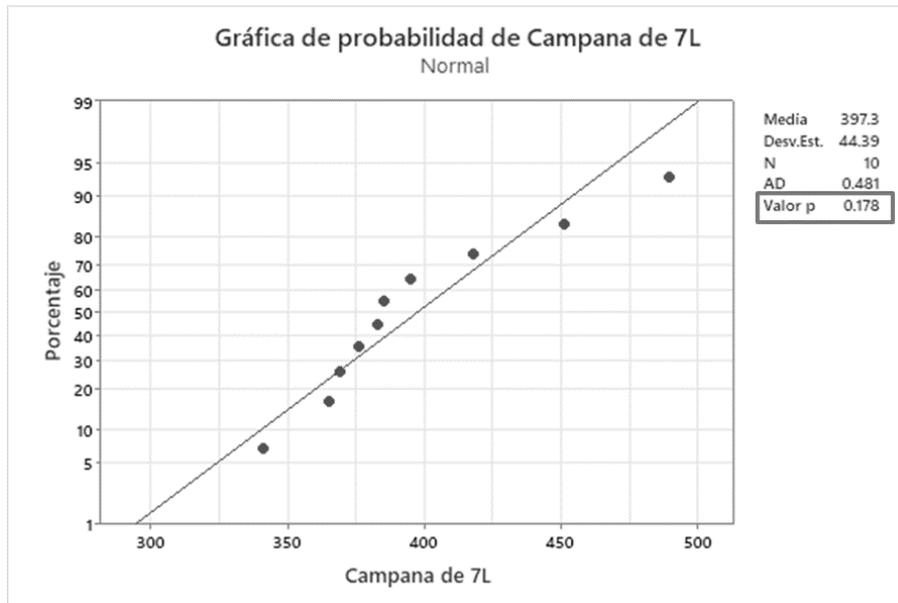
Prueba de normalidad: Esta prueba evalúa la normalidad calculando la correlación entre los datos y las puntuaciones normales de los datos. Si el coeficiente de correlación se encuentra cerca de 1, es probable que la población sea normal. [77]. A continuación, se procede a validar la normalidad de los datos:

- H_0 Los datos de la campana de 3L y 7L están normalmente distribuida
- H_1 La distribución de los datos se debía de Gaussian



Prueba de normalidad en Minitab – Campana 3L

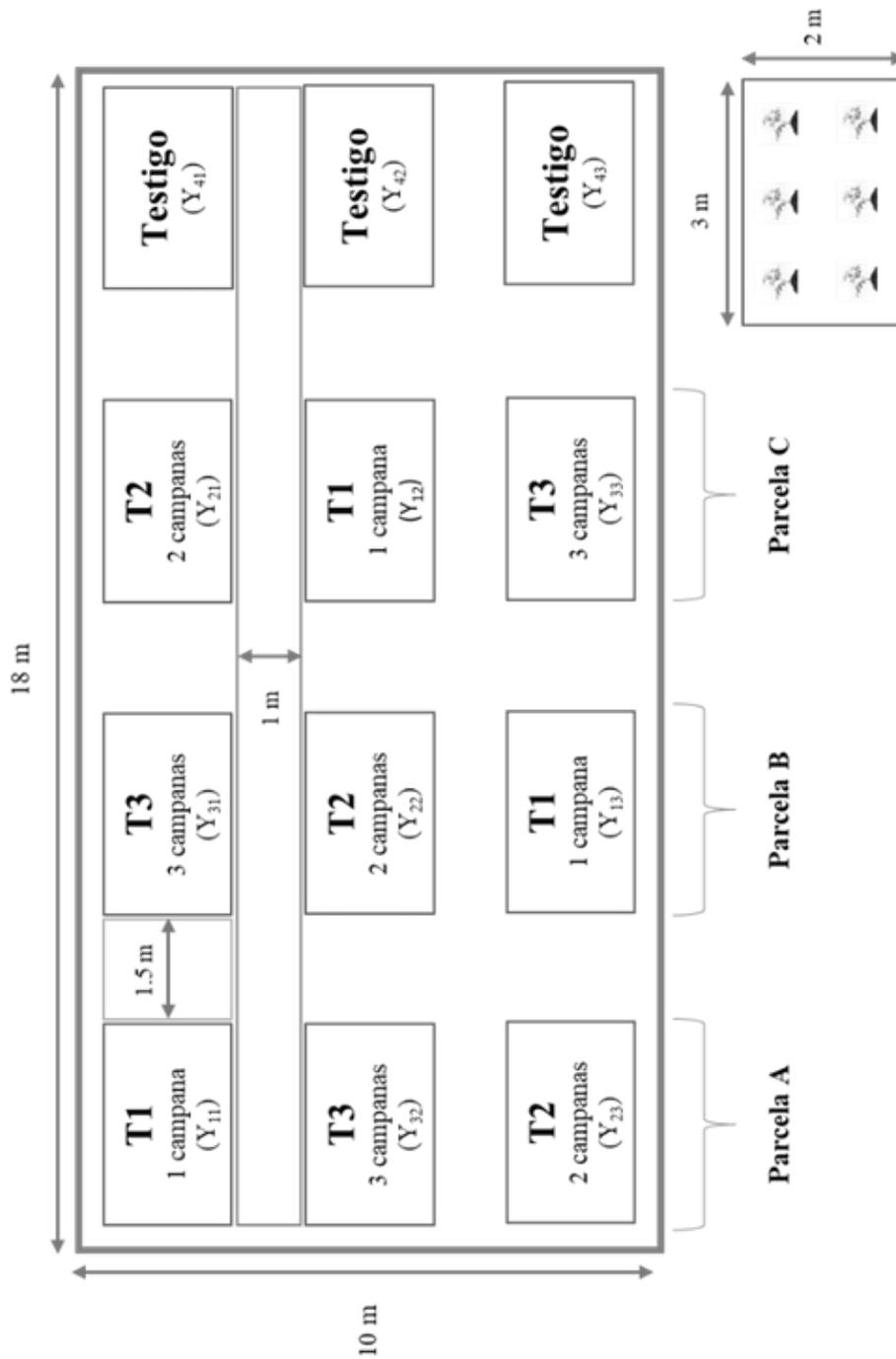
Los puntos de los datos están relativamente cerca de la línea de distribución normal ajustada. El valor p es mayor que el nivel de significancia α de 0.05. Por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal.



Prueba de normalidad en Minitab – Campana 7L

Los puntos de los datos están relativamente cerca de la línea de distribución normal ajustada. El valor p es mayor que el nivel de significancia α de 0.05. Por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal.

Apéndice 5. Distribución del DBCA del pimiento morrón



Apéndice 6. Modelo: Consumo agua cl vs. N° Campanas, Parcela – 35 días

Información del factor

| Factor | Tipo | Niveles | Valores |
|-------------|------|---------|---------|
| N° Campanas | Fijo | 3 | 1, 2, 3 |
| Parcela | Fijo | 3 | A, B, C |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Sec. | Contribución | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-------------|----|------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|
| N° Campanas | 2 | 2250575 | 98,82% | 2250575 | 1125288 | 269,98 | 0,000 |
| Parcela | 2 | 10133 | 0,44% | 10133 | 5067 | 1,22 | 0,387 |
| Error | 4 | 16672 | 0,73% | 16672 | 4168 | | |
| Total | 8 | 2277381 | 100,00% | | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuadrado | R-cuadrado (ajustado) | PRESS | R-cuadrado (pred) | AICc | BIC |
|---------|------------|-----------------------|-------|----------------------|--------|--------|
| 64,5604 | 99,27% | 98,54% | 84403 | 96,29% | 147,26 | 106,44 |

Coefficientes

| Término | Coef | EE del coef. | IC de 95% | Valor T | Valor p | FIV |
|-------------|--------|--------------|------------------|---------|---------|------|
| Constante | 1215,9 | 21,5 | (1156,2; 127,7) | 56,50 | 0,000 | |
| N° Campanas | | | | | | |
| 1 | -640,5 | 30,4 | (-725,0; -556,0) | -21,05 | 0,000 | 1,33 |
| 2 | 60,6 | 30,4 | (-23,9; 145,1) | 1,99 | 0,117 | 1,33 |
| Parcela | | | | | | |
| A | 4,4 | 30,4 | (-80,1; 88,9) | 0,15 | 0,891 | 1,33 |
| B | 38,7 | 30,4 | (-45,8; 123,2) | 1,27 | 0,272 | 1,33 |

Ecuación de regresión

$$\begin{aligned} \text{Consumo agua} &= 1215,9 - 640,5 \text{ N° Campanas}_1 + 60,6 \text{ N° Campanas}_2 \\ \text{cl} &+ 579,9 \text{ N° Campanas}_3 \\ &+ 4,4 \text{ Parcela A} + 38,7 \text{ Parcela B} - 43,1 \text{ Parcela C} \end{aligned}$$

Apéndice 7. Modelo: Consumo agua cl vs. N° Campanas, Parcela – 63 días

Información del factor

| Factor | Tipo | Niveles | Valores |
|-------------|------|---------|---------|
| N° Campanas | Fijo | 3 | 1, 2, 3 |
| Parcela | Fijo | 3 | A, B, C |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Sec. | Contribución | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-------------|----|----------|--------------|-----------|-----------|---------|---------|
| N° Campanas | 2 | 17417032 | 99.74% | 17417032 | 8708516 | 1270.45 | 0.000 |
| Parcela | 2 | 17919 | 0.10% | 17919 | 8959 | 1.31 | 0.366 |
| Error | 4 | 27419 | 0.16% | 27419 | 6855 | | |
| Total | 8 | 17462369 | 100.00% | | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuadrado | R-cuadrado (ajustado) | PRESS | R-cuadrado (pred) | AICc | BIC |
|---------|------------|-----------------------|--------|-------------------|--------|--------|
| 82.7930 | 99.84% | 99.69% | 138807 | 99.21% | 151.74 | 110.92 |

Coefficientes

| Término | Coef | EE del coef. | IC de 95% | Valor T | Valor p | FIV |
|-------------|---------|--------------|--------------------|---------|---------|------|
| Constante | 2613.8 | 27.6 | (2537.2, 2690.4) | 94.71 | 0.000 | |
| N° Campanas | | | | | | |
| 1 | -1519.1 | 39.0 | (-1627.5, -1410.7) | -38.92 | 0.000 | 1.33 |
| 2 | -323.1 | 39.0 | (-431.5, -214.7) | -8.28 | 0.001 | 1.33 |
| Parcela | | | | | | |
| A | 17.5 | 39.0 | (-90.8, 125.9) | 0.45 | 0.677 | 1.33 |
| B | 43.7 | 39.0 | (-64.6, 152.1) | 1.12 | 0.325 | 1.33 |

Ecuación de regresión

$$\begin{aligned} \text{Consumo agua} &= 2613.8 - 1519.1 \text{ N° Campanas}_1 - 323.1 \text{ N° Campanas}_2 \\ &+ 1842.2 \text{ N° Campanas}_3 \\ &+ 17.5 \text{ Parcela A} + 43.7 \text{ Parcela B} - 61.3 \text{ Parcela C} \end{aligned}$$

Apéndice 8. Modelo: Consumo agua cl vs. N° Campanas, Parcela – 84 días

Información del factor

| Factor | Tipo | Niveles | Valores |
|-------------|------|---------|---------|
| N° Campanas | Fijo | 3 | 1, 2, 3 |
| Parcela | Fijo | 3 | A, B, C |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Sec. | Contribución | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-------------|----|----------|--------------|-----------|-----------|---------|---------|
| N° Campanas | 2 | 13697766 | 99.64% | 13697766 | 6848883 | 897.45 | 0.000 |
| Parcela | 2 | 19630 | 0.14% | 19630 | 9815 | 1.29 | 0.370 |
| Error | 4 | 30526 | 0.22% | 30526 | 7631 | | |
| Total | 8 | 13747922 | 100.00% | | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuadrado | R-cuadrado (ajustado) | PRESS | R-cuadrado (pred) | AICc | BIC |
|---------|------------|-----------------------|--------|-------------------|--------|--------|
| 87.3582 | 99.78% | 99.56% | 154537 | 98.88% | 152.70 | 111.89 |

Coefficientes

| Término | Coef | EE del coef. | IC de 95% | Valor T | Valor p | FIV |
|-------------|---------|--------------|--------------------|---------|---------|------|
| Constante | 3018.0 | 29.1 | (2937.2, 3098.9) | 103.64 | 0.000 | |
| N° Campanas | | | | | | |
| 1 | -1574.6 | 41.2 | (-1689.0, -1460.3) | -38.24 | 0.000 | 1.33 |
| 2 | 136.6 | 41.2 | (22.3, 251.0) | 3.32 | 0.029 | 1.33 |
| Parcela | | | | | | |
| A | 12.0 | 41.2 | (-102.4, 126.3) | 0.29 | 0.786 | 1.33 |
| B | 50.3 | 41.2 | (-64.1, 164.6) | 1.22 | 0.289 | 1.33 |

Ecuación de regresión

$$\begin{aligned} \text{Consumo agua} &= 3018.0 - 1574.6 \text{ N° Campanas}_1 + 136.6 \text{ N° Campanas}_2 \\ &+ 1438.0 \text{ N° Campanas}_3 \\ &+ 12.0 \text{ Parcela A} + 50.3 \text{ Parcela B} - 62.2 \text{ Parcela C} \end{aligned}$$

Apéndice 9. Comparaciones para consumo agua cl – 35 días

Comparaciones por parejas de Fisher: N° Campanas

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y confianza de 95%

| N° Campanas | N | Media | Agrupación |
|-------------|---|---------|------------|
| 3 | 3 | 1795.78 | A |
| 2 | 3 | 1276.56 | B |
| 1 | 3 | 575.39 | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Pruebas individuales de Fisher para diferencias de las medias

| Diferencia de N° Campanas niveles | Diferencia de medias | EE de diferencia | IC individual de 95% | Valor T | Valor p |
|-----------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|---------|---------|
| 2 - 1 | 701.2 | 52.7 | (554.8, 847.5) | 13.30 | 0.000 |
| 3 - 1 | 1220.4 | 52.7 | (1074.0, 1366.7) | 23.15 | 0.000 |
| 3 - 2 | 519.2 | 52.7 | (372.9, 665.6) | 9.85 | 0.001 |

Nivel de confianza simultánea = 89.66%

Comparaciones por parejas de Fisher: Parcela

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y confianza de 95%

| Parcela | N | Media | Agrupación |
|---------|---|---------|------------|
| B | 3 | 1254.61 | A |
| A | 3 | 1220.33 | A |
| C | 3 | 1172.78 | A |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Pruebas individuales de Fisher para diferencias de las medias

| Diferencia de Parcela niveles | Diferencia de medias | EE de diferencia | IC individual de 95% | Valor T | Valor p |
|-------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|---------|---------|
| B - A | 34.3 | 52.7 | (-112.1, 180.6) | 0.65 | 0.551 |
| C - A | -47.6 | 52.7 | (-193.9, 98.8) | -0.90 | 0.418 |
| C - B | -81.8 | 52.7 | (-228.2, 64.5) | -1.55 | 0.196 |

Nivel de confianza simultánea = 89.66%

Apéndice 10. Comparaciones para consumo agua cl – 63 días

Comparaciones por parejas de Fisher: N° Campanas

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y confianza de 95%

| N° Campanas | N | Media | Agrupación |
|-------------|---|---------|------------|
| 3 | 3 | 4456.00 | A |
| 2 | 3 | 2290.72 | B |
| 1 | 3 | 1094.72 | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Pruebas individuales de Fisher para diferencias de las medias

| Diferencia de N° Campanas niveles | Diferencia de medias | EE de diferencia | IC individual de 95% | Valor T | Valor p |
|-----------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|---------|---------|
| 2 - 1 | 1196.0 | 67.6 | (1008.3, 1383.7) | 17.69 | 0.000 |
| 3 - 1 | 3361.3 | 67.6 | (3173.6, 3549.0) | 49.72 | 0.000 |
| 3 - 2 | 2165.3 | 67.6 | (1977.6, 2353.0) | 32.03 | 0.000 |

Nivel de confianza simultánea = 89.66%

Comparaciones por parejas de Fisher: Parcela

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y confianza de 95%

| Parcela | N | Media | Agrupación |
|---------|---|---------|------------|
| B | 3 | 2657.56 | A |
| A | 3 | 2631.33 | A |
| C | 3 | 2552.56 | A |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Pruebas individuales de Fisher para diferencias de las medias

| Diferencia de Parcela niveles | Diferencia de medias | EE de diferencia | IC individual de 95% | Valor T | Valor p |
|-------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|---------|---------|
| B - A | 26.2 | 67.6 | (-161.5, 213.9) | 0.39 | 0.718 |
| C - A | -78.8 | 67.6 | (-266.5, 108.9) | -1.17 | 0.309 |
| C - B | -105.0 | 67.6 | (-292.7, 82.7) | -1.55 | 0.195 |

Nivel de confianza simultánea = 89.66%

Comparaciones por parejas de Fisher: N° Campanas

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y confianza de 95%

| N° Campanas | N | Media | Agrupación |
|-------------|---|---------|------------|
| 3 | 3 | 6456.00 | A |
| 2 | 3 | 3154.67 | B |
| 1 | 3 | 1443.39 | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Pruebas individuales de Fisher para diferencias de las medias

| Diferencia de N° Campanas niveles | Diferencia de medias | EE de diferencia | IC individual de 95% | Valor T | Valor p |
|-----------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|---------|---------|
| 2 - 1 | 1711.3 | 71.3 | (1513.2, 1909.3) | 23.99 | 0.000 |
| 3 - 1 | 3012.6 | 71.3 | (2814.6, 3210.6) | 42.24 | 0.000 |
| 3 - 2 | 1301.3 | 71.3 | (1103.3, 1499.4) | 18.24 | 0.000 |

Nivel de confianza simultánea = 89.66%

Comparaciones por parejas de Fisher: Parcela

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y confianza de 95%

| Parcela | N | Media | Agrupación |
|---------|---|---------|------------|
| B | 3 | 3068.28 | A |
| A | 3 | 3030.00 | A |
| C | 3 | 2955.78 | A |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Pruebas individuales de Fisher para diferencias de las medias

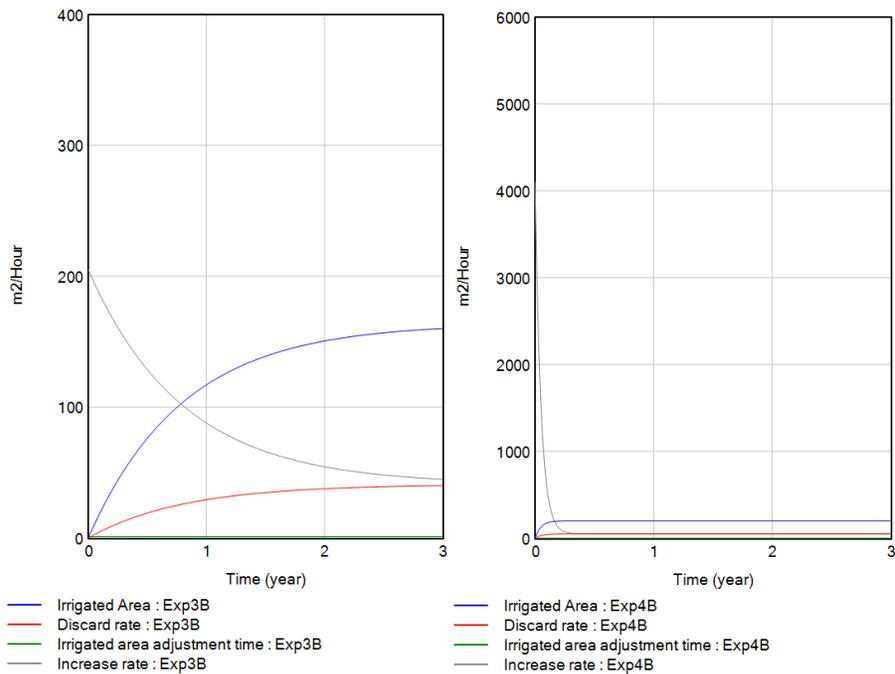
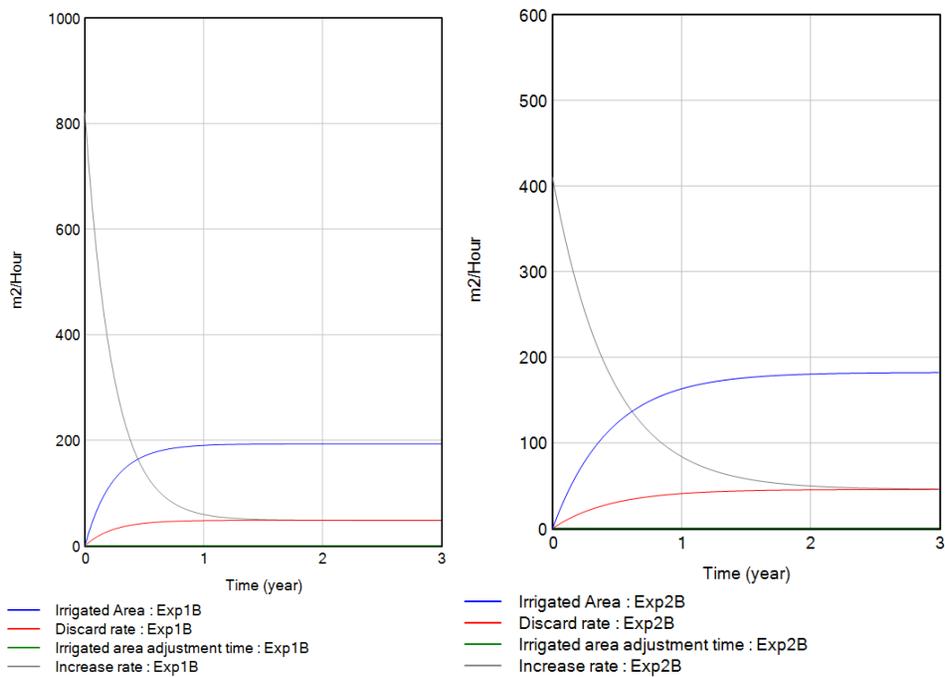
| Diferencia de Parcela niveles | Diferencia de medias | EE de diferencia | IC individual de 95% | Valor T | Valor p |
|-------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|---------|---------|
| B - A | 38.3 | 71.3 | (-159.8, 236.3) | 0.54 | 0.620 |
| C - A | -74.2 | 71.3 | (-272.3, 123.8) | -1.04 | 0.357 |
| C - B | -112.5 | 71.3 | (-310.5, 85.5) | -1.58 | 0.190 |

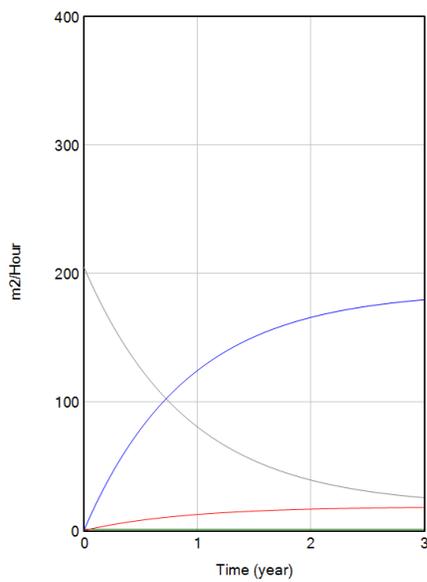
Nivel de confianza simultánea = 89.66%

Apéndice 12. Datos de simulación para plantas grandes

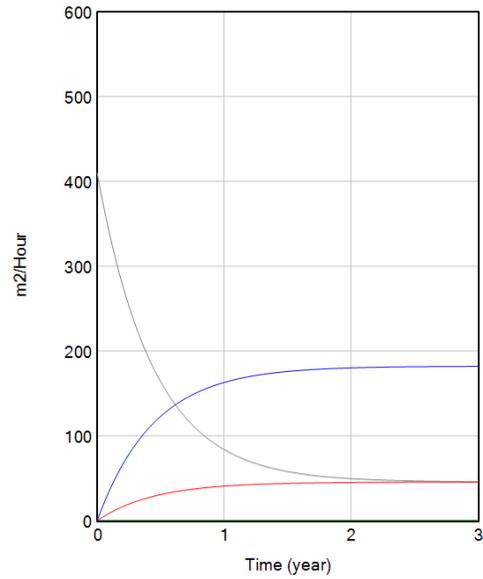
| Tasa del experimento real | | | | |
|--|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| | Unidades | Exp 19 | Exp 20 | Exp 21 |
| Área planeada | m ² | 180 | 180 | 180 |
| Tiempo de ajuste área regada | Horas | 0,50 | 0,10 | 1,50 |
| Tasa de descarte | 3/años | 0,18 | 0,18 | 0,15 |
| Tasa de descarte sostenible | | | | |
| | Unidades | Exp 22 | Exp 23 | Exp 24 |
| Área planeada | m ² | 180 | 180 | 180 |
| Tiempo de ajuste área regada | Horas | 0,50 | 1,00 | 1,50 |
| Tasa de descarte | 3/años | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| Tasa de descarte de Perú | | | | |
| | Unidades | Exp 25 | Exp 26 | Exp 27 |
| Área planeada | m ² | 180 | 180 | 180 |
| Tiempo de ajuste área regada | Horas | 0,50 | 1,00 | 1,50 |
| Tasa de descarte | 3/años | 0,45 | 0,45 | 0,45 |
| Tasa de descarte de Latinoamérica | | | | |
| | Unidades | Exp 28 | Exp 29 | Exp 30 |
| Área planeada | m ² | 180 | 180 | 180 |
| Tiempo de ajuste área regada | Horas | 0,50 | 1,00 | 1,50 |
| Tasa de descarte | 3/años | 0,35 | 0,35 | 0,35 |

Apéndice 13. Resultados de la simulación

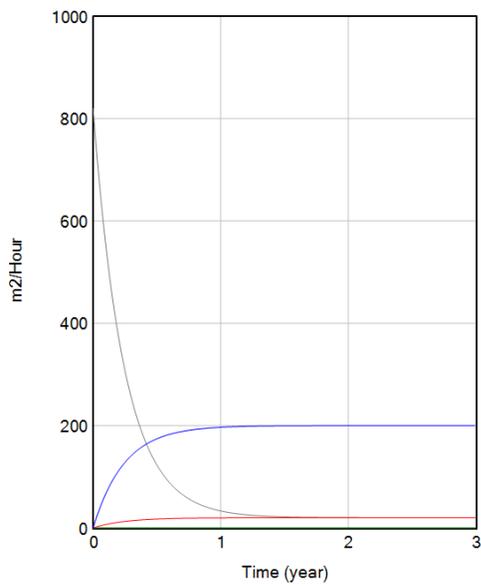




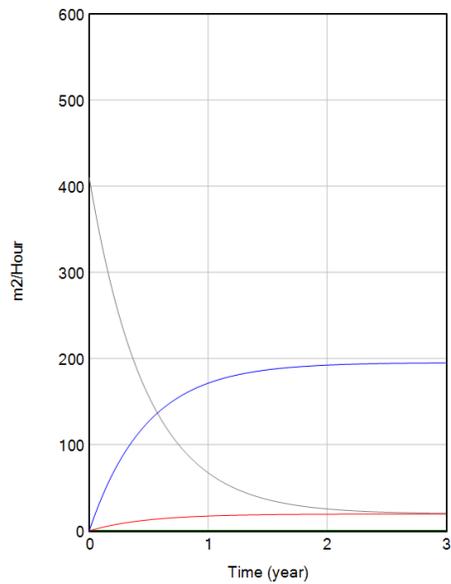
— Irrigated Area : Exp5B
 — Discard rate : Exp5B
 — Irrigated area adjustment time : Exp5B
 — Increase rate : Exp5B



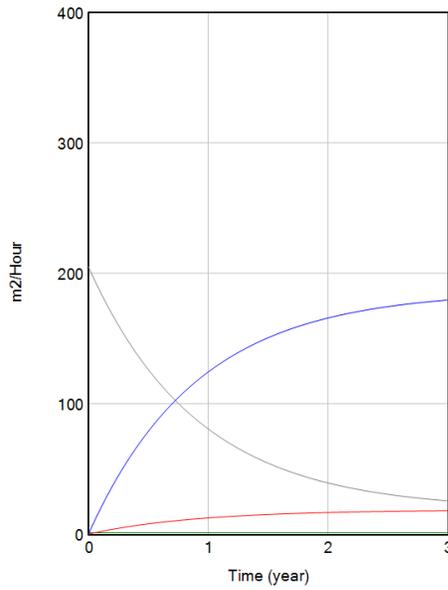
— Irrigated Area : Exp6B
 — Discard rate : Exp6B
 — Irrigated area adjustment time : Exp6B
 — Increase rate : Exp6B



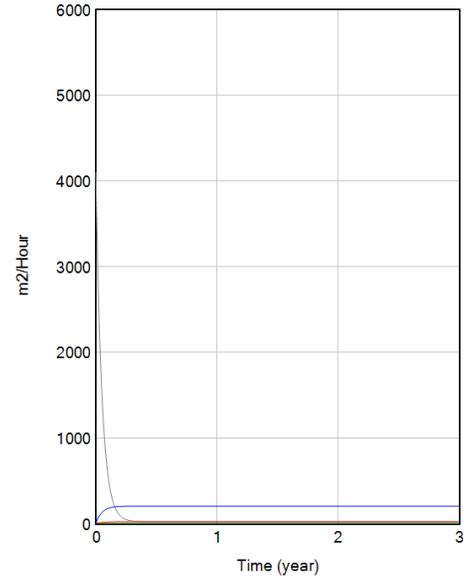
— Irrigated Area : Exp7B
 — Discard rate : Exp7B
 — Irrigated area adjustment time : Exp7B
 — Increase rate : Exp7B



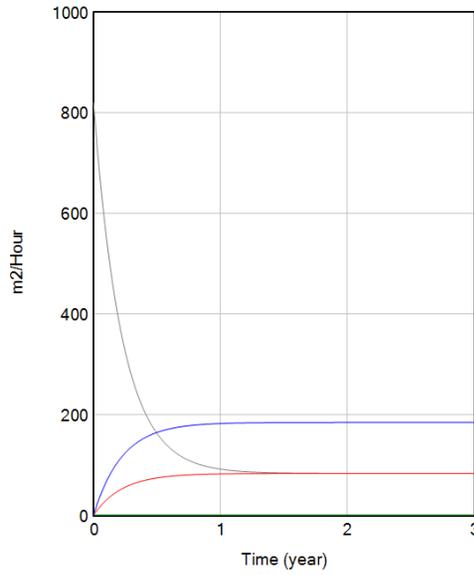
— Irrigated Area : Exp8B
 — Discard rate : Exp8B
 — Irrigated area adjustment time : Exp8B
 — Increase rate : Exp8B



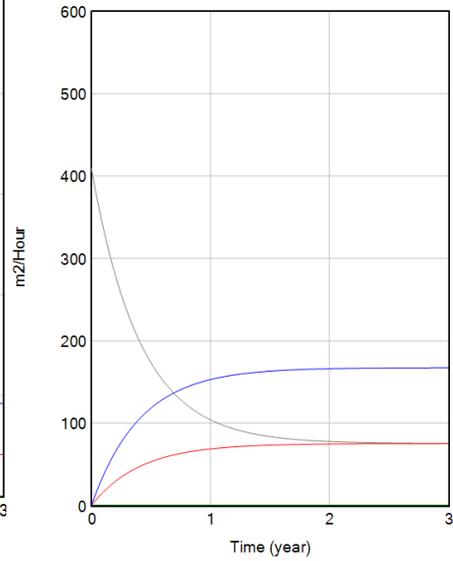
— Irrigated Area : Exp9B
 — Discard rate : Exp9B
 — Irrigated area adjustment time : Exp9B
 — Increase rate : Exp9B



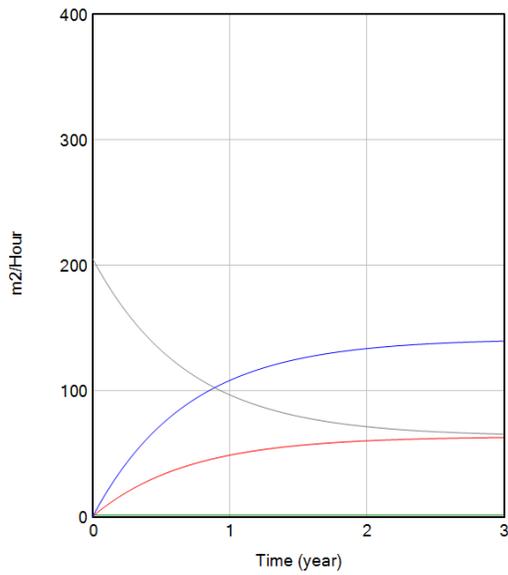
— Irrigated Area : Exp10B
 — Discard rate : Exp10B
 — Irrigated area adjustment time : Exp10B
 — Increase rate : Exp10B



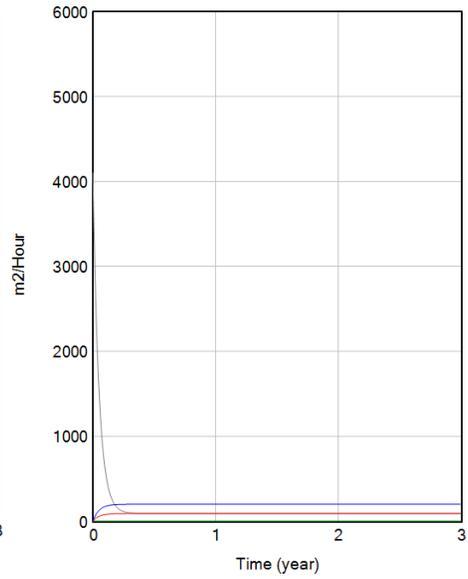
— Irrigated Area : Exp11B
 — Discard rate : Exp11B
 — Irrigated area adjustment time : Exp11B
 — Increase rate : Exp11B



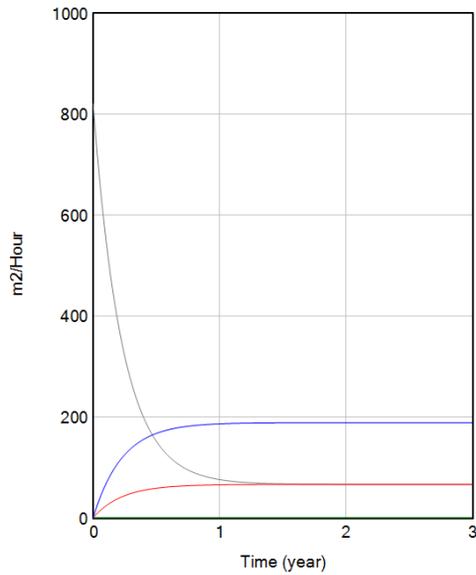
— Irrigated Area : Exp12B
 — Discard rate : Exp12B
 — Irrigated area adjustment time : Exp12B
 — Increase rate : Exp12B



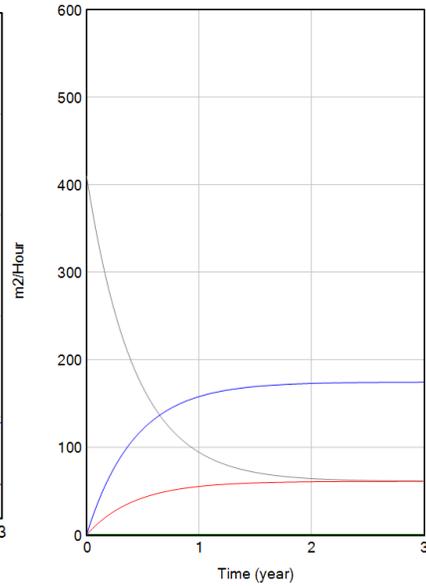
— Irrigated Area : Exp13B
 — Discard rate : Exp13B
 — Irrigated area adjustment time : Exp13B
 — Increase rate : Exp13B



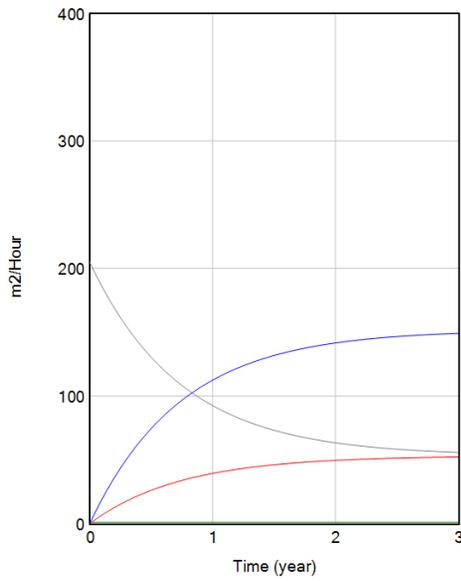
— Irrigated Area : Exp14B
 — Discard rate : Exp14B
 — Irrigated area adjustment time : Exp14B
 — Increase rate : Exp14B



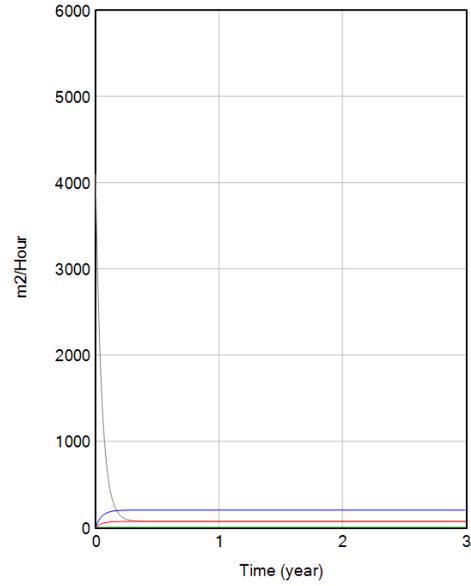
— Irrigated Area : Exp15B
 — Discard rate : Exp15B
 — Irrigated area adjustment time : Exp15B
 — Increase rate : Exp15B



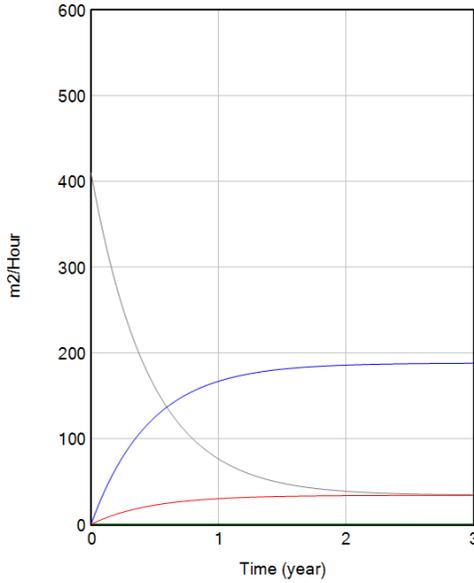
— Irrigated Area : Exp16B
 — Discard rate : Exp16B
 — Irrigated area adjustment time : Exp16B
 — Increase rate : Exp16B



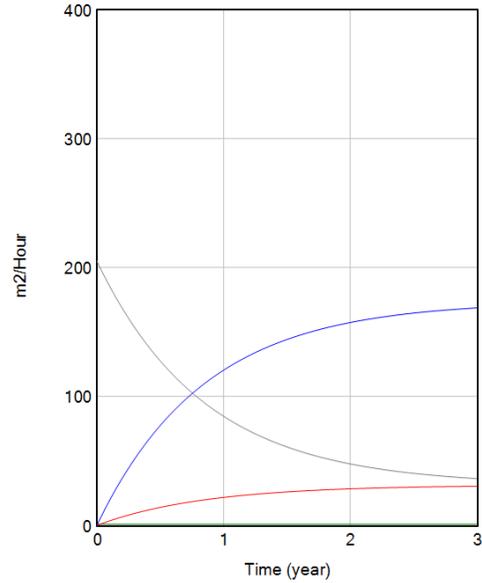
— Irrigated Area : Exp17B
 — Discard rate : Exp17B
 — Irrigated area adjustment time : Exp17B
 — Increase rate : Exp17B



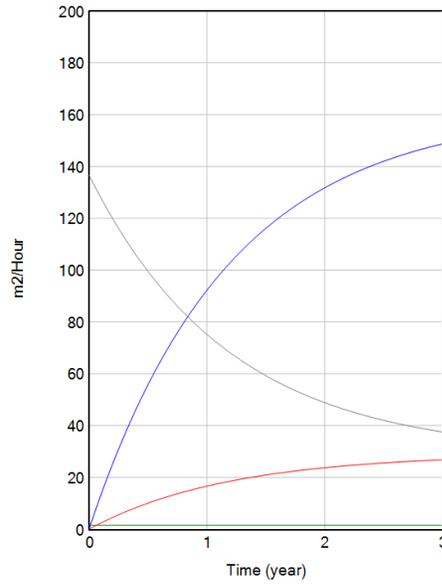
— Irrigated Area : Exp18B
 — Discard rate : Exp18B
 — Irrigated area adjustment time : Exp18B
 — Increase rate : Exp18B



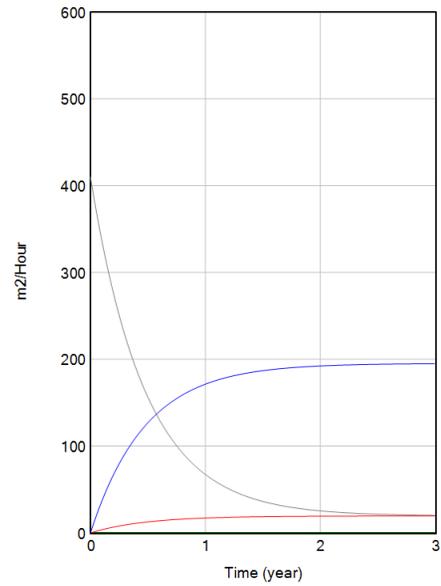
— Irrigated Area : Exp19B
 — Discard rate : Exp19B
 — Irrigated area adjustment time : Exp19B
 — Increase rate : Exp19B



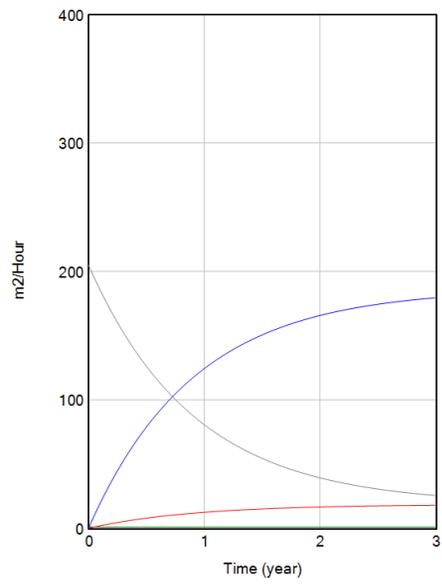
— Irrigated Area : Exp20B
 — Discard rate : Exp20B
 — Irrigated area adjustment time : Exp20B
 — Increase rate : Exp20B



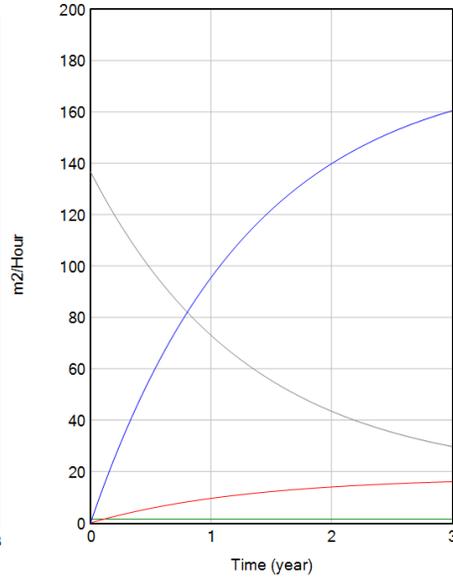
— Irrigated Area : Exp21B
 — Discard rate : Exp21B
 — Irrigated area adjustment time : Exp21B
 — Increase rate : Exp21B



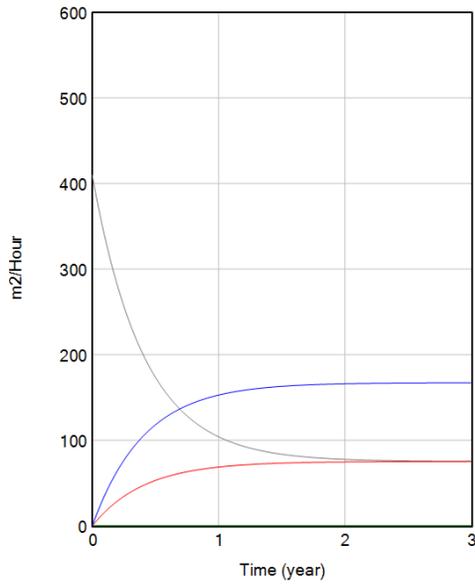
— Irrigated Area : Exp22B
 — Discard rate : Exp22B
 — Irrigated area adjustment time : Exp22B
 — Increase rate : Exp22B



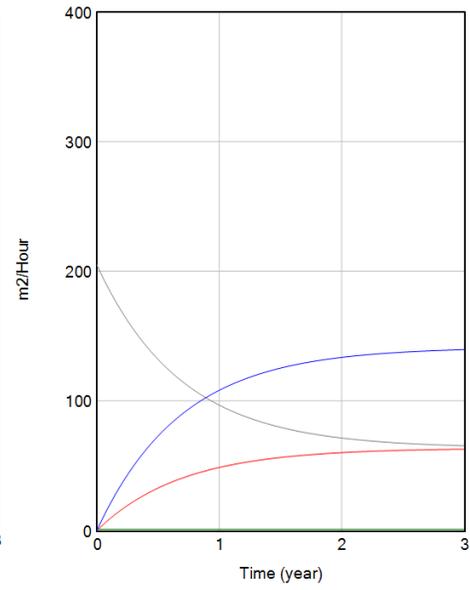
— Irrigated Area : Exp23B
 — Discard rate : Exp23B
 — Irrigated area adjustment time : Exp23B
 — Increase rate : Exp23B



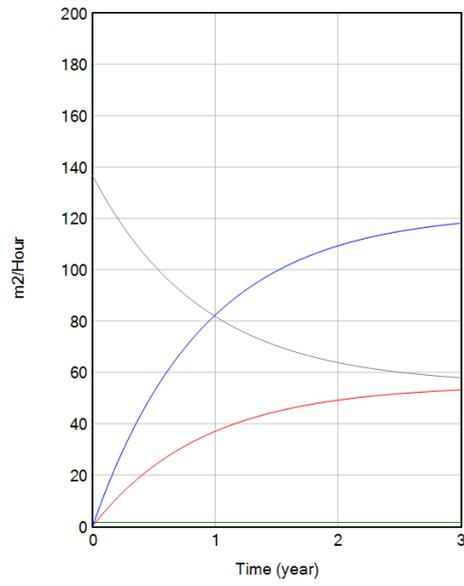
— Irrigated Area : Exp24B
 — Discard rate : Exp24B
 — Irrigated area adjustment time : Exp24B
 — Increase rate : Exp24B



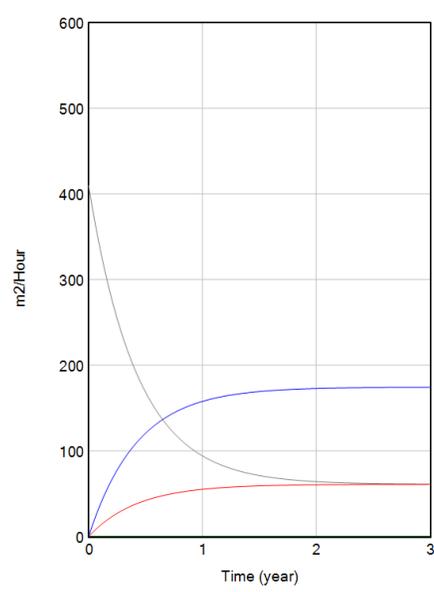
— Irrigated Area : Exp25B
 — Discard rate : Exp25B
 — Irrigated area adjustment time : Exp25B
 — Increase rate : Exp25B



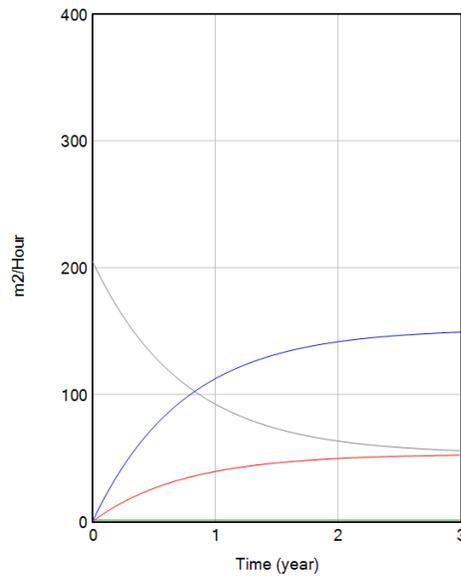
— Irrigated Area : Exp26B
 — Discard rate : Exp26B
 — Irrigated area adjustment time : Exp26B
 — Increase rate : Exp26B



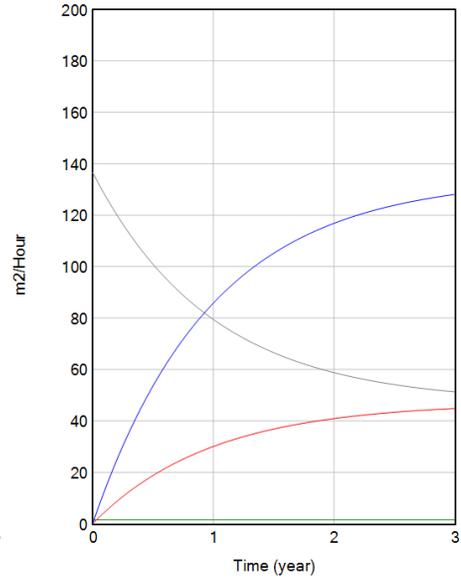
— Irrigated Area : Exp27B
 — Discard rate : Exp27B
 — Irrigated area adjustment time : Exp27B
 — Increase rate : Exp27B



— Irrigated Area : Exp28B
 — Discard rate : Exp28B
 — Irrigated area adjustment time : Exp28B
 — Increase rate : Exp28B



- Irrigated Area : Exp29B
- Discard rate : Exp29B
- Irrigated area adjustment time : Exp29B
- Increase rate : Exp29B



- Irrigated Area : Exp30B
- Discard rate : Exp30B
- Irrigated area adjustment time : Exp30B
- Increase rate : Exp30B