

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“MANEJO DEL FERTIRRIEGO PROPORCIONAL PARA
INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE USO DE AGUA Y
FERTILIZANTES EN PIMIENTO (*Capsicum sp*)”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
PARA OPTAR EL TÍTULO DE**

INGENIERO AGRÓNOMO

CRYSTIAN JOSÉ TORDOYA MOQUILLAZA

LIMA – PERÚ

2024

"MANEJO DEL FERTIRRIEGO PROPORCIONAL PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE USO DE AGUA Y FERTILIZANTES EN PIMIENTO (Capsicum sp)"

INFORME DE ORIGINALIDAD

7 %	6 %	1 %	2 %
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	aprenderly.com Fuente de Internet	1 %
2	intagri.com Fuente de Internet	1 %
3	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	1 %
4	Submitted to Universidad Nacional de Trujillo Trabajo del estudiante	1 %
5	agriculturers.com Fuente de Internet	<1 %
6	Nidia S. Sifuentes-Rodríguez, Aurelio Pedroza-Sandoval, Jorge A. Zegbe, Ricardo Trejo-Calzada. "INDICADORES DE PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD DE GEL DE SÁBILA EN CONDICIONES DE ESTRÉS SALINO", Revista Fitotecnia Mexicana, 2020 Publicación	<1 %

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

“MANEJO DEL FERTIRRIEGO PROPORCIONAL PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE USO DE AGUA Y FERTILIZANTES EN PIMIENTO (*Capsicum sp*)”

CRYSTIAN JOSÉ TORDOYA MOQUILLAZA

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

.....
Ing. Mg. Sc. Gilberto Rodríguez Soto
PRESIDENTE

.....
Ing. Mg. Sc. Ruby Antonieta Vega Ravello
ASESOR

.....
Ing. Mg. Sc. Pedro Pablo Gutiérrez Vílchez
MIEMBRO

.....
Ing. Mg. Sc. Isabel Maximiliana Montes
Yarasca
MIEMBRO

LIMA – PERÚ

2024

AGRADECIMIENTO

Gracias a mi madre por enseñarme que la mejor herencia es la educación, a mi padre que me enseñó a ser persistente con mis objetivos, a mis hermanos por darme la oportunidad de ser un ejemplo para ellos y a mi familia por los valores que me inculcaron porque sin ellos no sería el profesional ni la persona que soy.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	PROBLEMÁTICA	1
1.2	OBJETIVOS	1
1.2.1	Objetivo general.....	1
1.2.2	Objetivos específicos	2
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1	FERTIRRIGACIÓN.....	3
2.1.1	Ventajas y desventajas	3
2.1.2	Fertirrigación tradicional con dosificación cuantitativa	4
2.1.3	Fertirrigación proporcional	5
2.2	CÁLCULO DE LA LÁMINA DE RIEGO	6
2.2.1	Distribución del fertirriego en el bulbo de riego.....	7
III.	DESARROLLO DEL TRABAJO	9
3.1	ETAPA I: TRANSICIÓN.....	9
3.1.1	Equilibrio de iones	11
3.1.2	Balance vegetativo/generativo	13
3.1.3	Adaptaciones en la operación	15
3.1.4	Establecimiento de parámetros de monitoreo	21
3.2	ETAPA II: USO DE LA DOSIFICACIÓN PROPORCIONAL.....	22
3.2.1	Demanda de nutrientes.....	24
3.2.3	Demanda hídrica	27
3.1.3	Parámetros de monitoreo	28
3.3	ETAPA III: COMPARACIÓN.....	31
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	34

V.	CONCLUSIONES	35
VI.	RECOMENDACIONES	36
VII.	BIBLIOGRAFÍA.....	37
	ANEXOS.....	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes de fertilizantes que se utilizaron en el 2015	12
Tabla 2. Fuentes de fertilizantes que se utilizaron en el 2020	12
Tabla 3. Soluciones nutritivas utilizadas por etapa en mEq L-1	15
Tabla 4. Formulación de la solución madre concentrada	18
Tabla 5. Formulación de los tanques de fertilización	18
Tabla 6. Programa de fertilización del Fundo Niño Jesús 2020	20
Tabla 7. Monitoreo de la conductividad eléctrica (CE) en dS m-1 y el pH en el perfil del suelo en la calicata del lote 3 el 22-08-16	21
Tabla 8. Reporte de la concentración de nutrientes en la materia seca en los diferentes órganos de la planta	25
Tabla 9. Cálculo del peso de una planta y acumulación de nutrientes ideal de pimiento Peppadew	26
Tabla 10. Consumo de agua durante la campaña de pimiento Jalapeño	28
Tabla 11. Registro de parámetros de monitoreo de la solución fertirriego (SFR) del Fundo Gandufresh 2018	29
Tabla 12. Comparativo de consumo de agua y fertilizantes en pimiento Morrón desde el 2015 hasta el 2019	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva de absorción de nutrientes de pimiento Morrón	5
Figura 2. Distribución de la humedad y la salinidad en el bulbo de riego	8
Figura 3. Distribución cuantitativa del aporte nutritivo en pimiento Cherry por semana... 10	
Figura 4. Distribución proporcional del aporte nutritivo en Jalapeño por semana..... 10	
Figura 5. Crecimiento vegetativo y crecimiento generativo..... 13	
Figura 6. Parámetros para cambiar tendencia de crecimiento en plantas de tomate. 14	
Figura 7. Distribución de la C.E según los equipos de inyección más comunes..... 16	
Figura 8. Monitoreo de la conductividad eléctrica (CE) durante el tiempo de riego en un fertirriego convencional..... 22	
Figura 9. Comparación de la conductividad eléctrica (CE) en dS m-1 entre la distribución cuantitativa y proporcional	24
Figura 10. Distribución de la conductividad eléctrica (CE) en dS m-1 y el pH en el bulbo de riego	30
Figura 11. Fenología Lagrima rojo M2T5 campaña 2017-2018 vs Lagrima rojo M1T4 2016 - 2017.....	33

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N° 1. Escenario actual	38
------------------------------------	----

RESUMEN

En el presente trabajo de suficiencia profesional comparto mi experiencia en Gandules, empresa agroexportadora de diversas variedades de capsicums ubicada en el norte del país, con sedes en Jayanca - Lambayeque y San Pedro de Lloc – La Libertad. En esta empresa colaboré en el área de riego y nutrición durante cuatro años, y mi objetivo principal fue implementar el manejo del riego con dosificación proporcional de soluciones nutritivas, con las que se lograron resultados muy positivos en la mejora de la productividad de los cultivos como el incremento de la eficiencia de uso de agua y de fertilizantes, principalmente. Es por ello, que en el documento se describe la estrategia que nos ayudó a cambiar el manejo de la fertilización con dosificación cuantitativa hacia un manejo de la fertilización con inyección proporcional de las soluciones nutritivas, donde se detalla el proceso de adaptación, las dificultades, los aciertos y desaciertos que se presentaron a lo largo de su implementación. Los años de trabajo en Gandules dejan una valiosa experiencia, en la que el trabajo en equipo y el esfuerzo de cada uno de sus integrantes contribuye a cumplir con los objetivos propuestos por la gerencia agrícola de la compañía en aras de incrementar la productividad de los campos.

Palabras clave: Estrategias, soluciones, nutritivas, dosificación, proporcional

ABSTRACT

In this work of professional sufficiency I share my experience in the company Gandules, an agro-exporting company of several varieties of capsicums located in the north of the country, with offices in Jayanca - Lambayeque and San Pedro de Lloc - La Libertad. In this company I collaborated in the area of irrigation and nutrition for four years, a period in which irrigation management with proportional dosing of nutrient solutions was implemented, with which very positive results were achieved in improving crop productivity and increasing the efficiency of water and fertilizer use, mainly. For this reason, the document describes the strategy that helped us to change the fertilization management with quantitative dosage towards a fertilization management with proportional injection of nutrient solutions, detailing the adaptation process, the difficulties, the successes and failures that occurred throughout its implementation. The years of work in Gandules leave a valuable experience, in which teamwork and the effort of each of its members contribute to meet the objectives proposed by the agricultural management of the company in order to increase the productivity of the fields.

Keywords: Proportional, dosing, nutrient, solution, strategy

I. INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMÁTICA

La fertilización de los cultivos es una de las herramientas más importantes en la producción agrícola, ya que una nutrición balanceada y en niveles óptimos nos ayuda a tener mejores rendimientos. En el Perú son evidentes las grandes diferencias entre pequeños y grandes productores; por un lado, los pequeños agricultores no cuentan con el conocimiento técnico, el presupuesto o el equipamiento para hacer un manejo óptimo, mientras que las empresas agroexportadoras que sí cuentan con estos recursos, muchas veces no los usan de manera eficiente.

El método de fertilización más usado en la agroindustria es la fertirrigación; sin embargo, no necesariamente es la opción más eficiente, ya que si no se ejecuta correctamente puede generar problemas como lavado de fertilizantes, antagonismo de nutrientes o salinización de suelos, lo que conlleva a usar mayores cantidades de agua y fertilizante que las que requiere el cultivo. Una estrategia alternativa que incrementa la eficiencia en el uso de los recursos y de los insumos es la fertilización con inyección proporcional; es por ello, que este trabajo de suficiencia profesional comparte la experiencia en la implementación del fertirriego proporcional en una empresa agrícola para aumentar la eficiencia de uso de agua y fertilizantes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Dar a conocer la fertilización con dosificación proporcional de soluciones nutritivas como alternativa para incrementar los rendimientos con uso eficiente de agua y de fertilizantes.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Detallar los procesos de la implementación de la fertirrigación proporcional.

Describir el uso de herramientas prácticas y aplicables en campo para monitorear la eficiencia del suministro hídrico y aporte nutritivo a través de la fertirrigación proporcional.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 FERTIRRIGACIÓN

La fertirrigación es la forma más común de quimigación, en la cual se aplica los fertilizantes en el agua de riego (Burt, 2019) de forma continua o intermitente (Ferreyra *et al.*, 2005). Es una técnica moderna usada en agricultura, la cual maximiza los rendimientos y a la vez reducir la polución ambiental, incrementando la eficiencia de uso de los fertilizantes al reducir sus cantidades aplicadas y aumentar los beneficios económicos de su inversión (Bar-Yosef, 1999). En esta tecnología es muy importante el momento, cantidades y concentración de los fertilizantes aplicados al cultivo a través de la infraestructura de riego, los cuales son controlados fácilmente (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

La fertirrigación ha contribuido con la revolución tecnológica y no sólo representa una nueva técnica de riego sino, sobre todo, una nueva técnica de cultivo (Pizarro, 1996).

2.1.1 Ventajas y desventajas

Pizarro (1996) describe detalladamente las ventajas del fertirriego, pero enfatiza que esta técnica presenta inconvenientes por los errores el manejo de la nutrición del cultivo. De acuerdo a Ferreyra *et al.* (2005) y Pizarro (1996), las principales ventajas son: ahorro de fertilizantes, mejor asimilación de los nutrientes, mejor distribución de la solución fertirriego aplicada, aporte nutritivo en función a la demanda del cultivo, rapidez de respuesta para corregir deficiencias y facilidad de suministrar todos los elementos nutritivos y oportunidad de usar el sistema para aplicar agroquímicos. En cuanto a las desventajas, hay dos principales: formación de precipitados por incompatibilidad de fertilizantes que obturan accesorios del sistema e incremento significativo del potencial osmótico de la solución fertirriego. Por otro lado, Burt (2019) destaca sus beneficios en relación al ahorro de energía, principalmente porque el agua y los fertilizantes no tienen que recorrer todo el campo para llegar a la planta, además de los ya mencionados.

Son sus grandes beneficios los que han permitido que el fertirriego se posicione como el método de riego más utilizado en la agricultura de exportación peruana; sin embargo, muchas veces se asume como una tecnología altamente eficiente y es poco monitoreada y/o controlada. La empresa consideraba un aporte y distribución homogéneo del fertilizante y el agua en el campo en función de la programación calendarizada del riego y la fertilización por etapa fenológica del cultivo, sin validar su buen funcionamiento a través de evaluaciones de la distribución de la humedad en el perfil del suelo, la conductividad eléctrica (CE) en la solución fertirriego, solución suelo y suelo, condiciones meteorológicas, entre otros.

De acuerdo con Kafkafi y Tarchitzky (2012), el mismo requerimiento nutricional (dosis de fertilizante) del cultivo, el cual es aportado por etapa fenológica puede seguir patrones de aplicación diferentes, variaciones que se realizan considerando a la especie vegetal, las características del suelo y las del sistema de manejo del establecimiento. En el primero, la dosificación es cuantitativa y consiste en inyectar una cantidad determinada de fertilizante en el sistema de riego durante cada aplicación de agua. En el segundo, la dosificación es proporcional, es decir, en este método se mantiene una relación constante y predeterminada entre el volumen de agua de riego y el volumen de solución fertilizante, cuyo resultado es una concentración constante de nutrientes en el agua de riego. En ambos casos pueden inyectarse y controlarse de manera manual o automática.

2.1.2 Fertirrigación tradicional con dosificación cuantitativa

La nutrición de cultivos aspira a proporcionar todas las condiciones necesarias para que los elementos esenciales se encuentren disponibles para los cultivos en cantidades y concentraciones suficientes para que no lleguen a transformarse en factores limitantes del desarrollo de los mismos. Cuando la concentración de alguno de los nutrientes en la planta es inferior al nivel de suficiencia se observan trastornos nutricionales que se traducen en la disminución de los rendimientos, es decir, se expresa la ley del mínimo. De manera similar, cuando la concentración de nutrientes es muy elevada se produce toxicidad, con la consecuente caída del crecimiento y de la producción de un cultivo (Vidal, 2019).

En esta fertirrigación se programa los kilogramos de N, P₂O₅, K₂O, CaO y/o MgO que se deben aplicar en una hectárea para un cultivo determinado y su inyección se realiza a través de venturi o bombas de inyección (Ferreya *et al.*, 2005). La figura 1 es un ejemplo gráfico de la dosificación cuantitativa, en ella se aprecia los kilogramos de N, P₂O₅, K₂O y CaO que

se aplican al pimiento Cherry por semana. Normalmente, su distribución de nutrientes esta calendarizada y sigue una curva de extracción de nutrientes referencial del cultivo en función al tiempo, donde la demanda de los nutrientes aumenta o disminuye según la necesidad de la especie vegetal por etapa fenológica.

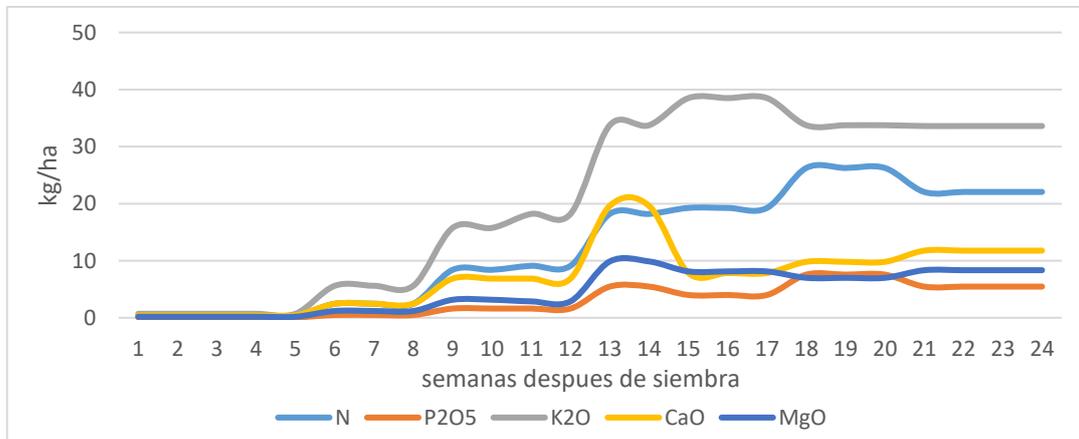


Figura 1. Curva de absorción de nutrientes de pimiento Morrón

2.1.3 Fertirrigación proporcional

La solución nutritiva es una mezcla de elementos químicos en solución, a una concentración y relación óptima entre nutrientes, de tal forma que favorece su absorción por el cultivo. Las plantas absorben los nutrientes minerales de la solución nutritiva que está en el suelo, que contiene a los nutrientes como iones disueltos que poseen carga eléctrica, es decir, absorben sus formas iónicas específicas. Para calcular el balance catiónico-aniónico debemos medir el número de cargas, por lo que se debe utilizar una unidad que integre tanto el peso molecular del ion y su carga eléctrica, la cual se denomina equivalente (Vidal, 2019).

En 1999, Bar-Yosef, ya consideraba importante fertirrigar con soluciones nutritivas en bajas concentraciones, pero a pesar de aportar los nutrientes en concentraciones tomando en cuenta diversos factores, aún sus cálculos estaban basados en kilogramos de fertilizante por día.

Burt (2019) define a la fertirrigación proporcional como aquella que se realiza a través de una dosificación proporcional, donde el caudal de inyección se ajusta para mantener la concentración de la solución nutritiva en el agua de riego. Además, indica que necesita equipos de inyección proporcional especiales, en el Perú se usan mucho los Fertijet.

De acuerdo con Vidal (2019), esta inyección se ha propuesto para cultivos y frutales manejados en forma intensiva, donde se realiza el monitoreo permanente del sistema suelo-planta porque es fundamental. Estos sistemas ofrecen la oportunidad de reponer el agua y los nutrientes cada vez que se crea oportuno; por lo tanto, el papel del suelo como despensa o almacén de nutriente pasa a un segundo plano, pero no se excluye. Por ello, su principal ventaja es el balance en la distribución de nutrientes en el agua y en el suelo.

- En el agua porque al equilibrar el aporte de cargas se facilita el ingreso de los iones en la planta.
- En el suelo porque un riego adecuado aporta nutrientes balanceados y los distribuye homogéneamente en el bulbo de riego, con lo que se evita tener zonas con diferentes concentraciones que fomentan un ambiente de competencia entre los mismos.

Adicionalmente, Burt (2019) considera que la solución automáticamente aplicada al campo se inyecta continuamente a bajas dosis, lo que está de acuerdo a las tasas de absorción de los cultivos y elimina los problemas como corrosión de los equipos y accesorios en la infraestructura o incompatibilidad en las soluciones preparadas.

El seguimiento analítico en estos sistemas debe estar basado en la fracción soluble del nutriente que son los elementos que verdaderamente están a disposición para ser absorbidos y asimilados por la planta. Resulta básico el análisis de agua de riego para elaborar adecuadamente las soluciones nutritivas que aportamos al cultivo con el fin de tener un balance y concentración de nutrientes optimizados en la solución suelo (Vidal, 2019).

2.2 CÁLCULO DE LA LÁMINA DE RIEGO

Como es de nuestro conocimiento, a través del riego reponemos el agua que la planta requiere y la extrae por sus raíces y la evaporada directamente desde el suelo.

El volumen de agua a reponer se calcula como una lámina de agua de altura en milímetros que cubre la hectárea. Vidal (2019) indica que el cálculo de la lámina de riego depende de las propiedades físicas del suelo como su estructura y las porciones de arena, limo y arcilla que afectan la capacidad de retención de agua, el requerimiento hídrico del cultivo y las condiciones climáticas. Mientras Avidan (1994) incluye a las características del terreno, la fuente de agua y el sistema de riego como datos complementarios para este cálculo.

La lámina de riego se calculaba en base a los datos disponibles y el intervalo entre riegos se determinaba tomando en cuenta los días transcurridos desde el último riego y la evapotranspiración acumulada. Para el establecimiento de la planificación o la programación del riego, muchas veces no se consideró la integración de todos los factores mencionados por Avidan (1994) y Vidal (2019) porque no se contaba con la información; por ello, solo se usaba datos de la demanda hídrica del cultivo y la evaporación del suelo. Se tenía una visión incompleta del riego, que si bien es cierto contemplaba las necesidades del cultivo, no tomaba en cuenta la capacidad del suelo para almacenar el volumen de agua aplicada.

El cálculo del riego debe incluir la capacidad de retención del suelo para la profundidad de enraizamiento del cultivo y la lixiviación, esta última se incorpora al cálculo cuando se necesita evitar la acumulación de sales en la zona radicular. También, es importante recordar que el exceso de riego conduce al movimiento del agua más allá de la zona de la raíz, reduciendo la eficiencia al lixiviar los nutrientes (Vidal, 2019).

2.2.1 Distribución del fertirriego en el bulbo de riego

Bar-Yosef (1999) y Mmolawa y Or (2000) destacan la importancia de conocer el sistema radicular por su dinámica interacción con el agua y los nutrientes. Kafkafi y Tarchitzky (2012) señalan que la distribución de agua y nutrientes aportados a través del riego por goteo es vital para determinar el patrón de distribución de las raíces; además, la profundización de la humedad en el perfil influye en la distribución de los nutrientes para una mejor exploración radicular. En sistemas de riego por goteo, cuando el mojado se centra en la superficie, el agua en el suelo es vulnerable a perderse por evaporación al interactuar más con el medioambiente y el suelo acumula gradualmente sales en su superficie. La figura 2 muestra la distribución de la humedad y la salinidad en el bulbo de riego producido por un riego inadecuado.

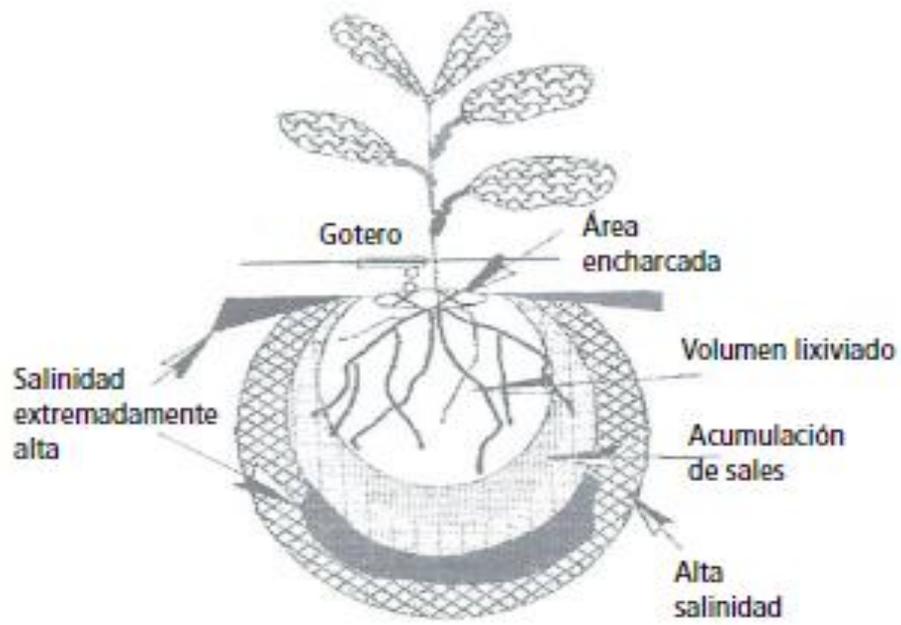


Figura 2. Distribución de la humedad y la salinidad en el bulbo de riego

Fuente: Kafkafi y Tarchitzky (2012).

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 ETAPA I: TRANSICIÓN

En esta etapa se vivenció los cambios y adaptaciones hacia la implementación de la fertilización con inyección proporcional; por ello, se consideró lo siguiente:

- Primero, como sería la nueva estructuración de manejo del capsicum con fertirriego proporcional para conocer el sistema de producción y adaptar su manejo.
- Segundo, asegurar que se cumplan todos los procedimientos del monitoreo nutricional establecidos para que la información obtenida sea veraz y permita adaptar la inyección a las condiciones reales del campo, de tal manera que los factores no controlables no influyan en el manejo del cultivo.
- Tercero, conocer la estructura que da soporte a la interacción agua-suelo-planta-sistema, a fin de que todos los equipos y accesorios (número, capacidad, etc.) involucrados en esta operación permitan ejecutar eficientemente la inyección proporcional.
- Cuarto, profundizar en la caracterización de los fertilizantes a utilizar en el establecimiento del plan de manejo nutricional para determinar con mayor precisión el cuándo, el cómo y qué soluciones aplicar y la relación con su eficiencia.
- Quinto, conocer el costo-beneficio del manejo y la cantidad de fertilizantes para determinar si la propuesta es rentable.

La operación se realizaba en base a la calendarización del cultivo respecto al NPK y siempre se administraban las mismas cantidades de nutrientes en la semana correspondiente (llamada distribución cuantitativa), pero todos los días se fertilizaba con distintos nutrientes; además, como referente de la demanda de nutrientes se consideraba la curva de extracción del pimiento Morrón (Figura 1).

Para desarrollar un plan de nutrición consistente que sea intermedio entre el manejo convencional de la fertirrigación, el cual considera el aporte nutritivo como una distribución

cuantitativa (Figura 3), y la nueva propuesta de fertirriego con inyección proporcional que implica la distribución de nutrientes proporcionalmente (Figura 4), fue necesario determinar aquellos cambios que tenían mayor impacto y no representaban un riesgo al modificar la operación, tanto en el aspecto logístico como en el estado nutricional del cultivo.

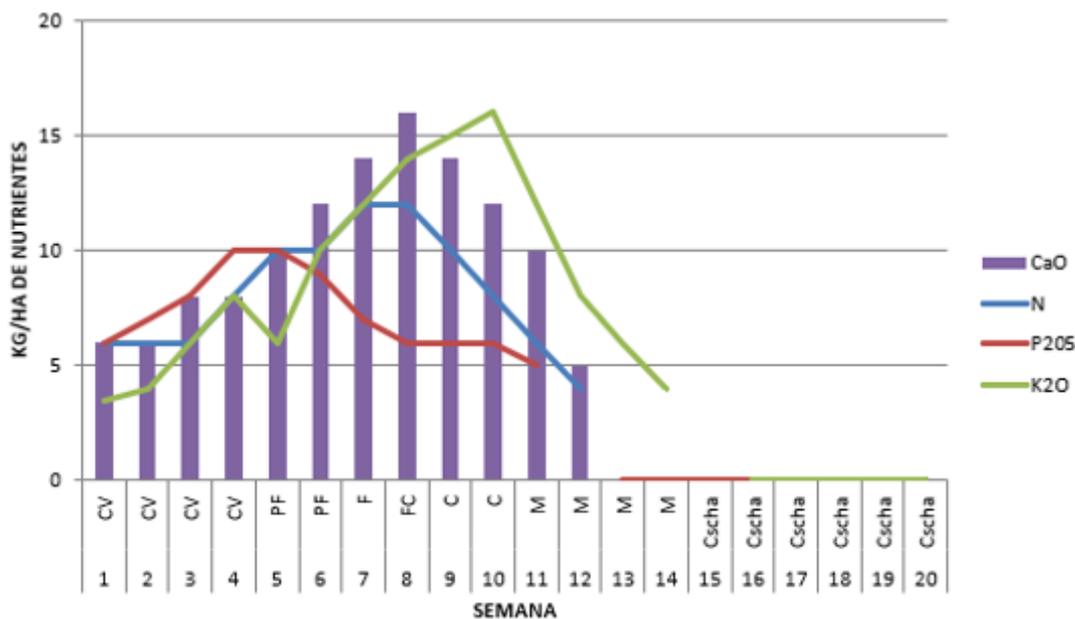


Figura 3. Distribución cuantitativa del aporte nutritivo en pimiento Cherry por semana

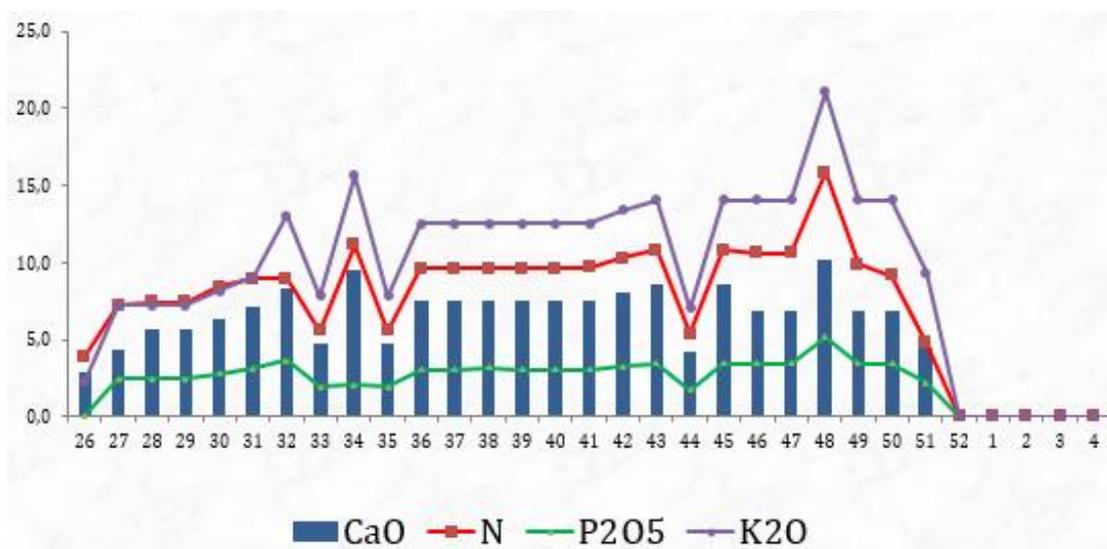


Figura 4. Distribución proporcional del aporte nutritivo en Jalapeño por semana

Por ello, se evaluó el nuevo plan de fertirrigación y se destacaron los puntos que se mejoraban como la elección de las fuentes de los nutrientes de acuerdo a las condiciones y

a las aplicaciones aisladas de nutrientes como en el caso del calcio. Asimismo, se analizó cada beneficio que se podía obtener del fertirriego proporcional, como:

3.1.1 Equilibrio de iones

Un punto a observar en el fertirrigación convencional es el intervalo de tiempo que se utiliza para distribuir los nutrientes, pues sólo considera los kg ha⁻¹ de cada nutriente en la semana en que se aplican (Figura 3) y no su distribución en el momento en el que la planta está absorbiendo los mismos (Figura 4). Por esta razón, es común observar manejos en los que los nutrientes se administran en distintos días, por ejemplo, el lunes se aplica el fósforo, el nitrógeno y el potasio, el martes se suministra el calcio y el miércoles se aporta los microelementos. En este escenario se cumpliría con la distribución semanal; sin embargo, gran proporción del fertilizante se está administrando de manera ineficiente y podría ocasionar inconvenientes como competencia entre nutrientes en el momento de la absorción, distribución heterogénea de nutrientes en el bulbo de riego, lavado de nutrientes si la aplicación no se ejecuta correctamente y mayor gasto de energía de la planta debido al incremento de la CE del agua. Los efectos adversos de un ineficiente suministro del riego y de fertilizantes se acentúan más en suelos de baja retentividad de agua y capacidad de almacenamiento de nutrientes, como los suelos de textura arenosa.

Por consiguiente, el primer cambio que se realizó fue en el equilibrio de la solución a aplicar, lo que potenciaría la eficiencia de absorción de los iones al momento del riego y orientaría la elección de fuentes de fertilizante más adecuadas para la solución. Como refiere Bar-Yosef (1999), la elección del fertilizante está sujeta a las características del sistema, agua, suelo, cultivo y manejo del mismo.

En la tabla 1 se detalla los fertilizantes que se usaban en el fertirriego convencional que no consideraba el equilibrio de iones; en consecuencia, la nueva lista de fertilizantes (Tabla 2) incluye a los fertilizantes adecuados para las condiciones de riego específicas del lugar de producción.

En la fertilización convencional, las fuentes de nitrógeno usadas tendían a estimular una planta muy vegetativa; además, usar amonio generaba cierto grado de competencia con otros cationes importantes como el calcio o el potasio. Respecto al potasio y al magnesio, usar fuentes con sulfatos era conveniente desde el punto de vista económico, pero con ciertas limitantes desde lo técnico, como el grado de solubilidad.

Los cambios de fertilizantes fueron importantes porque permitió equilibrar las formas iónicas de los nutrientes en la solución de riego, lo que evito la competencia entre los mismos y de esta manera aumentaron su eficiencia de uso. Por ejemplo, en el caso del nitrógeno, un gran porcentaje era aportado en forma de nitrato, lo que permitía sinergia en la absorción con el potasio o el calcio.

Tabla 1. Fuentes de fertilizantes que se utilizaron en el 2015

Fuentes de fertilizantes 2015	Ley (%)				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Nitrato de amonio	33				
Urea	46				
Nitrato de calcio	15			26	
Ácido fosfórico		61			
Sulfato de potasio			50		
Sulfato de magnesio					16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Fuentes de fertilizantes que se utilizaron en el 2020

Fuentes de fertilizantes 2020	Ley (%)				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Nitrato de amonio	33				
Nitrato de calcio	15			26	
Nitrato de magnesio	11				15
Nitrato de potasio	13		45		
Ácido fosfórico		61			
Sulfato de potasio			50		

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Balance vegetativo/generativo

Otro de los cambios iniciales estuvo fundamentado en el manejo del balance vegetativo y generativo en las plantas, que muchas veces era subestimado porque no es muy bien entendido o está mal ejecutado, ya que en la mayoría de las ocasiones sólo se limitaba a aumentar unidades de N, P, K o Ca según el criterio del ingeniero responsable, una práctica basada en la subjetividad y que no era tan efectiva y generaba incrementos en el presupuesto de fertilización.

Según INTAGRI (2020) y Vidal (2019), se debe tener un cuidadoso balance entre el crecimiento vegetativo o generativo que interese en cada momento, con ello podemos ejercer un control exhaustivo de su nutrición. Una planta generativa es aquella en la que prevalece el desarrollo de procesos reproductivos, tales como floración, fructificación, maduración de frutos, detención de crecimiento vegetativo. Mientras que, una planta vegetativa es la que muestra un comportamiento opuesto, gasta su energía fundamentalmente en la división celular y crecimiento. Una planta vegetativa se caracteriza por tener hojas grandes y suculentas, escasa carga de flores y frutos, entrenudos largos, flexibilidad en la estructura, brotes vigorosos. Una planta generativa, por el contrario, se caracteriza por entrenudos cortos, crecimiento vegetativo detenido, hojas pequeñas, quebradizas, estructuras lignificadas, aceleramiento de los procesos reproductivos.

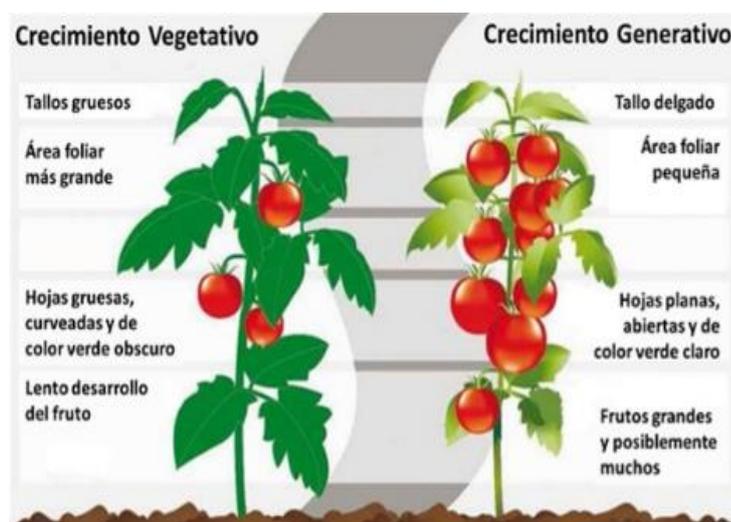


Figura 5. Crecimiento vegetativo y crecimiento generativo

Fuente: INTAGRI tomado de Blok et al, (2019).

Asimismo, el direccionamiento del crecimiento se puede lograr a través de modificaciones en el ambiente (temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂), nutrición (aporte de N y K, nitrato y amonio), riego (duración, frecuencia, conductividad eléctrica de la solución fertirrigadora, contenido de humedad del suelo) y manejo del cultivo (podas, cosecha) (INTAGRI, 2020). Es por ello, que trabajamos a nivel de la fertilización y la herramienta de soporte para manejar el balance vegetativo y generativo en las plantas fue la relación N/K aportado en mEq porque la predominancia de cada elemento promueve funciones fisiológicas específicas.

Parámetro	Tendencia vegetativa	Tendencia generativa
Riego: Duración y frecuencia	Más cortos y más frecuentes	Más largos y menos frecuentes
Inicio de riego	Más pronto	Más tarde
Fin de riego	Más tarde	Más pronto
Lixiviación	Más lixiviación, C.E. disminuye	Menos lixiviación, C.E. sube
C.E. en el sustrato	Baja	Alta
C.E. del riego (2.5 a 4 dS/m)	Más baja	Más alta
Contenido de agua en sustrato	Más alto	Más bajo
Déficit de humedad	Más bajo	Más alto
Temperatura (T°)	Temperaturas templadas	Temperaturas cálidas o bajas
Diferencia de T° día/noche	Menor	Mayor
Velocidad: Cambio de T° día/noche	Lento	Rápido
T° de raíz con respecto a la cabeza	Mayor	Menor
Humedad relativa	Alta	Baja
CO ₂ (350 a 1000 ppm)	Menos	Más
Nutrición	Altos contenidos Ca, NO ₃ y NH ₄	Altos contenidos K y SO ₄

Figura 6. Parámetros para cambiar tendencia de crecimiento en plantas de tomate.

Fuente: INTAGRI tomado de Blok et al, (2019).

El manejo de esta relación no fue fácil, al principio se elaboraron 5 soluciones nutritivas con el fin de cubrir la demanda de nutrientes en cada etapa fenológica; sin embargo, se fue adaptando a las necesidades fisiológicas determinadas por los niveles de consumo de nutrientes y la facilidad para ejecutar el programa de riego en la operación, lo cual fue

fundamental para potenciar la eficiencia y el éxito de la ejecución, quedando finalmente con 3 soluciones que garantizaron una nutrición adecuada, facilitaron los cambios de tendencia de crecimiento de vegetativo a generativo y facilitaron la operación y supervisión de los programas de riego y nutrición. Asimismo, también fue necesario ajustar el aporte de la proporción $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ para regular la asimilación y no generar condiciones que favorezcan a la intoxicación de la planta y controlar la etapa vegetativa.

En la tabla 3 se muestra la concentración en mEq L^{-1} aportados por las soluciones nutritivas por etapa y las relaciones N/K y $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, donde se observa que hacia la formación de frutos (etapa generativa) la relación N/K se reduce y la proporción $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ se incrementa.

Las soluciones generaban un incremento de C.E al agua base de riego de 1 mEq L^{-1} para la solución vegetativa, 1.2 mEq L^{-1} para la intermedia y 1.4 mEq L^{-1} para la generativa. La solución vegetativa tenía el objetivo de cubrir todos los nutrientes requeridos para el desarrollo de las plantas priorizando su primera etapa de crecimiento es decir el crecimiento de tejidos como hojas, brotes y tallos. Por otro lado, la solución intermedia y la solución generativa además de cubrir la demanda de nutrientes tenían como objetivo dar la señal a las plantas de priorizar la traslocación con mayor o menor intensidad, es por eso que lo que diferencia a las 3 soluciones son los niveles de concentración de potasio y fueron usadas a partir del inicio de la floración.

Tabla 3. Soluciones nutritivas utilizadas por etapa en mEq L^{-1}

ETAPA	INCREMENTO DE C.E (dSm^{-1})	IONES EN LAS SOLUCIONES (mEq L^{-1})								N/K	NO_3^- / NH_4^+
		NO_3^-	H_2PO_4^-	SO_4^{-2}	NH_4^+	K^+	Ca^{+2}	Mg^{+2}			
Vegetativa	1	10.5	0.8	3.3	1.5	4	8	4	3.0	7.0	
Intermedia	1.2	10.5	0.8	3.3	0.5	5.5	8	4	2.0	21	
Generativa	1.4	10.5	0.8	3.3	0.5	7	8	4	1.6	21	

3.1.3 Adaptaciones en la operación

Llevar a la práctica estos dos primeros puntos fue una tarea fácil en la planificación; sin embargo, se presentaron con dificultades en la operación porque muchas veces los

trabajadores con mayor experiencia son más resistentes al cambio, por lo que parte del trabajo se orientó en enseñarles las diferencias entre ambas formas de fertilizar.

Otro problema que se enfrentó radicaba en que los equipos de fertirriego estaban diseñados para usarse de la manera tradicional, se usaban bombas que inyectaban altos volúmenes en poco tiempo, esto impedía iniciar con la inyección proporcional ya que el tiempo que se necesitaba para regar era mayor que el requerido para fertilizar, lo que generaba un aumento de la concentración durante el tiempo de la inyección. Esto tenía un impacto directo en la distribución de nutrientes en el bulbo de riego ya que el tiempo de menor concentración era prácticamente agua pura, lo que generaba un efecto de lavado.

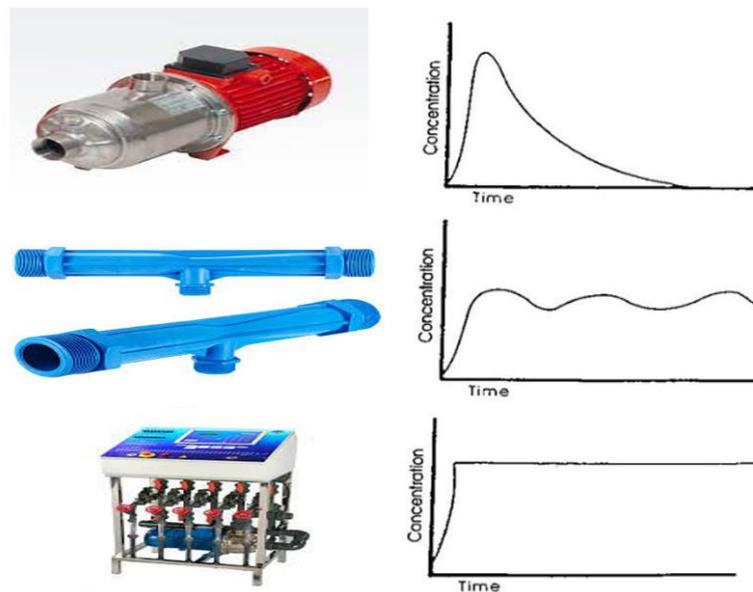


Figura 7. Distribución de la C.E según los equipos de inyección más comunes.

Por ese motivo, fue muy importante conocer la estructura del balance suelo-agua-planta. Respecto al suelo, era importante conocer su capacidad de almacenamiento de agua y nutrientes que podían ser aprovechados por las raíces para orientar el volumen de riego y el caudal de inyección; en cuanto al agua, necesitábamos conocer a detalle las características del agua y del sistema de riego para poder utilizarlos eficientemente, y con relación a la planta, se debía conocer el momento en el que necesitaba agua y la frecuencia de esta demanda.

Las producciones demandadas por la compañía estaban creciendo y naturalmente demandaban sembrar más áreas, sin embargo la cantidad y calidad del agua del fundo era limitada. Se contaba con once pozos de los cuales solo tres tenían una conductividad eléctrica menor a 1 dSm^{-1} , otros tres tenían una conductividad entre 2 y 3 dSm^{-1} , dos pozos más estaban entre 4 y 6 dSm^{-1} y el último pozo operativo tenía más de 10 dSm^{-1} los últimos dos estaban fuera de operación por sus altas conductividades. De esta forma se tenía un caudal de 129 litros por segundo como máximo con una conductividad aproximada de 3 dSm^{-1} .

Ante este escenario se decidió cerrar el pozo de más alta conductividad y tratar con una planta de osmosis los pozos con conductividades mayores a 4 dSm^{-1} . Esto generó una disminución en la oferta de agua del 11% al cerrar uno de los pozos y 13% adicional del agua de los pozos tratados con la planta de osmosis. Esta decisión nos permitiría tener un agua base para regar en máxima capacidad no mayor a 2 dSm^{-1} aumentando la probabilidad de mejorar el rendimiento pero que implicaba reducir la cantidad de agua además de una gran inversión económica. La justificación que le dio sustento a esta decisión además de la parte técnica, fue el contexto en el que se encontraba la operación, ya que no teníamos la opción de construir más pozos ya que estábamos en zona de veda (Anexo 1).

Uno de los objetivos era establecer un equilibrio iónico de la solución fertirriego, por lo cual se elaboró una solución madre balanceada (Tabla 4) considerando el aporte del agua de riego (Anexo 1), que se dividió en tres tanques (Tabla 5). Para la preparación de la solución madre se consideró el equilibrio de aniones y cationes en unidades miliequivalente por litro de solución (mEq L^{-1}) y de acuerdo al ion a utilizar se eligió el fertilizante (Tabla 4).

El tanque 1 contenía la mayoría de las fuentes, mientras el tanque 2 contenía al calcio y al boro que fueron separados por compatibilidad entre el calcio con los fosfatos y los sulfatos, el boro adicionado se mantuvo en adecuada relación Ca/B. Finalmente, el tanque 3, contenía el sulfato de potasio para administrar potasio y cambiar de una solución vegetativa a una generativa y viceversa (Tabla 5). Al preparar los tanques de esta forma también se evitó colocar más fertilizante del que el agua puede diluir, evitando las formaciones de precipitados en las bases de los tanques.

Tabla 4. Formulación de la solución madre concentrada

ANIONES (mEq L ⁻¹)	CATIONES (mEq L ⁻¹)					Aniones totales (mEq L ⁻¹)	FERTILIZANTE A USAR	kg 1000 L ⁻¹ (250 veces)
	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	H ⁺			
	1						Nitrato de amonio	20.000
NO ₃ ⁻		4				10.5	Nitrato de potasio	101.000
							Nitrato de magnesio	0.000
			5.5				Nitrato de calcio	148.500
H ₂ PO ₄ ⁻					0.8	0.8	Ácido fosfórico	19.600
SO ₄ ⁻²				2.5		5.5	Sulfato de magnesio	76.875
		3					Sulfato de potasio	65.250
Cationes totales (mEq L⁻¹)	1	7	5.5	2.5	0.8	16.8		

Tabla 5. Formulación de los tanques de fertilización

TANQUE	FERTILIZANTE	kg tanque ⁻¹	kg L ⁻¹
1 (2000 L)	Nitrato de amonio	40.0	0.02
	Nitrato de potasio	202.0	0.10
	Ácido fosfórico	39.0	0.02
	Sulfato de magnesio	154.0	0.08
	Sulfato de zinc	0.7	0.00
	Sulfato de cobre	0.1	0.00
	Sulfato de manganeso	0.9	0.00
2 (2000 L)	Nitrato de calcio	297.0	0.15
	Ácido bórico	1.4	0.001
3 (2000 L)	Sulfato de potasio	130.5	0.065

Este cambio en la preparación de los tanques generó dificultades la elaboración de los reportes, ya que los operadores estaban familiarizados en la aplicación de kilogramos de fertilizantes y se confundían al tener que calcular los kilogramos de fertilizante que contenían los litros de las soluciones preparadas. Este problema se pudo corregir enseñando a realizar el cálculo con una tabla simple de conversiones y haciendo un programa de cuantos litros de

cada tanque se debían aplicar a cada campo, lográndose emitir reportes del programa de fertilización como se muestra en la figura 5.

Si bien es cierto, la fertilización no estaba llegando a ser totalmente proporcional, se observaron beneficios en la primera campaña como la facilidad en la ejecución de los programas de fertilización porque antes si habían 15 campos en producción se tenían 15 programas de fertilización con diferencias en fuentes y cantidades; por ello, al pasar al uso de las soluciones habían como máximo 3 programas que variaban solo las cantidades de soluciones a aplicar y con la ventaja de que los campos recibían todos los días todos los nutrientes requeridos, es decir, como la fertilización estaba calendarizada para cada semana, todos los lotes tenían un programa de fertilización distinto todas las semanas que dependía de las de fuentes de fertilización y el estado fenológico; por otro lado, al trabajar con las soluciones nutritivas se decidía cuál de las tres soluciones era la más adecuada en ese momento. Bajo este cambio, en la mayoría de los cultivos se redujo entre 15 y 25% la aplicación de agua y fertilizantes y también disminuyó la incidencia de deficiencia de calcio en los cultivos, a pesar de que se redujeron las cantidades aplicadas por campaña, lo que se puede atribuir al efecto de la proporcionalidad del aporte nutritivo.

Tabla 6. Programa de fertilización del Fundo Niño Jesús 2020

Cultivo	Lote/Turno	Área	Fecha de Transporte	Solución	Concentración	Minutos	Litros Aplicados/semana			Litros Aplicados/semana		
							F1	F3	F2	F1	F3	F2
Green Chilli	NJ-M1T01	9,96	07-abr-20	intermedia	40%	150,00	1013,1	324,2	607,8	7091,5	2269,3	4254,9
Green Chilli	NJ-M1T02	9,93	16-abr-20	intermedia	35%	150,00	883,8	282,8	530,3	6186,4	1979,6	3711,8
Jalapeño Verde	NJ-M1T04	1,00	28-abr-20	intermedia	30%	120,00	61,0	19,5	36,6	427,2	136,7	256,3
Cherry Rojo	NJ-M1T03	9,44	24-may-20	intermedia	30%	120,00	576,1	184,4	345,7	4032,8	1290,5	2419,7
Jalapeño Verde	NJ-M1T01	9,05	15-may-20	intermedia	30%	75,00	560,9	0,0	336,6	3926,6	0,0	2355,9
Jalapeño Rojo	NJ-M1T04	1,59	27-abr-20	Vegetativa	30%	75,00	98,6	0,0	59,1	689,9	0,0	413,9
Cherry Rojo	NJ-M1T04	9,07	27-abr-20	Vegetativa	30%	120,00	553,6	177,1	332,1	3874,7	1239,9	2324,8
Jalapeño Rojo	NJ-M1T05	10,47	08-may-20	intermedia	30%	120,00	639,0	0,0	383,4	4472,8	0,0	2683,7
Jalapeño Verde	NJ-M1T02	8,98	09-may-20	Vegetativa	30%	75,00	556,6	0,0	334,0	3896,2	0,0	2337,7
Jalapeño Verde	NJ-M1T04- Jalap 115	1,20	11-may-20	intermedia	30%	120,00	73,2	23,4	43,9	512,6	164,0	307,6
Jalapeño Verde	NJ-M1T03 - IQF	9,51	16-may-20	Vegetativa	30%	120,00	580,4	0,0	348,2	4062,7	0,0	2437,6
Jalapeño Rojo	NJ-M1T06 - IDF	9,00	19-may-20	Vegetativa	30%	75,00	557,8	0,0	334,7	3904,9	0,0	2342,9
Jalapeño Verde	NJ-M1T04	7,46	30-may-20	Vegetativa	30%	75,00	462,4	0,0	277,4	3236,7	0,0	1942,0

Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Establecimiento de parámetros de monitoreo

El monitoreo inicial se basó en el criterio de conocer el comportamiento de la solución fertirrigadora y el crecimiento y la distribución de raíces en el perfil del suelo, que es son algunos principios de la fertirrigación que menciona Bar-Yosef (1999). Se realizó el seguimiento de la conductividad eléctrica (CE) en dS m^{-1} y el pH en la solución fertirriego durante todo el tiempo de aplicación y en el suelo dentro del bulbo húmedo para evitar el lavado de los nutrientes, competencias iónicas y almacenamiento de agua y nutrientes fuera del alcance de las raíces. Estas evaluaciones iniciales ayudaron a ajustar tanto la lámina de riego como la concentración de nutrientes requerida en la solución.

El monitoreo de la CE en el perfil de suelo a través de la evaluación en calicatas (Tabla 6) ayudó a identificar la mayor concentración de sales y a analizar si estas coincidían con la mayor parte de la zona radicular para asegurar una absorción de nutrientes eficiente porque las raíces influyen el patrón de distribución y absorción de agua y nutrientes, tal como lo indican Mmolawa y Or (2000). Sabiendo la profundidad de las raíces de cada cultivo sabíamos hasta donde debíamos regar y fertilizar.

Tabla 7. Monitoreo de la conductividad eléctrica (CE) en dS m^{-1} y el pH en el perfil del suelo en la calicata del lote 3 el 22-08-16

MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)	CE (dS m^{-1})	pH	OBSERVACIONES
1	5	0.59	7.05	
	10	0.58	7.93	
	15	0.89	8.00	Los datos fueron tomados
	20	1.86	7.93	debajo del gotero
	25	2.75	8.03	
	30	3.68	8.04	

Por otro lado, el seguimiento de la CE durante el tiempo de riego (Figura 6 y 7) permitió conocer el momento en que llegaba el fertilizante y en que concentración, lo cual ayudaba a evitar lavados ya que como comente antes nuestros equipos de inyección no estaban diseñados para fertilizar eficientemente y era común que el tiempo de llegada del fertilizante

desde el punto de inyección hasta el último punto que se quería regar, fuera de una hora y el tiempo de inyección del fertilizante de 20 minutos, es decir como mínimo tendría que regar 85 minutos, considerando 5 minutos de agua pura para ayudar a profundizar a los nutrientes. Esta no es la manera más eficiente de regar, pero al menos nos aseguramos que el fertilizante llegue y se quede al alcance de las raíces. Su principal desventaja es que en el próximo riego del mismo campo se va a regar durante una hora con agua pura antes que llegue el fertilizante, lo que genera un efecto de lavado en el bulbo de riego perdiendo homogeneidad. Por otro lado, verificar que las inyecciones de fertilizante se estaban haciendo correctamente ayudo mucho a entender mejor la visión de un riego eficiente.

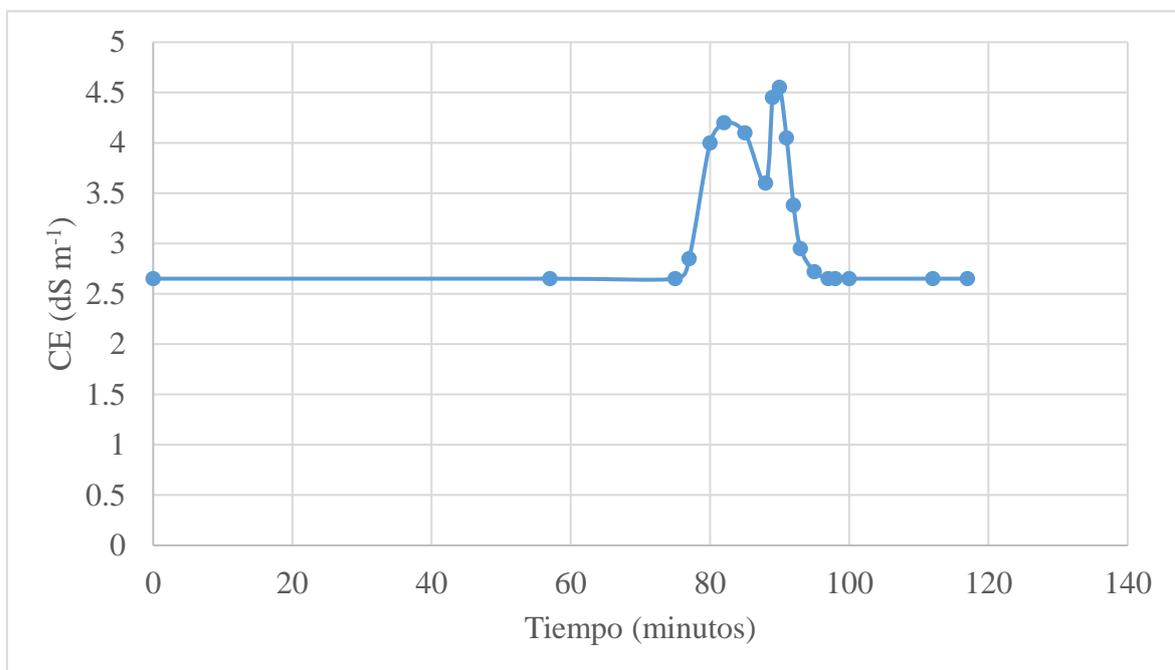


Figura 8. Monitoreo de la conductividad eléctrica (CE) durante el tiempo de riego en un fertirriego convencional

3.2 ETAPA II: USO DE LA DOSIFICACIÓN PROPORCIONAL

La dosificación proporcional de las soluciones nutritivas se usó con mayor frecuencia cuando se implementó su inyección proporcional. Cada vez que se regaba caían las gotas con la misma concentración de nutrientes durante todo el ciclo de riego. El uso de las soluciones nutritivas estaba claro y también la preparación y el reporte de las mismas en los tanques. Sin embargo, apareció otro desafío relacionado a la dosificación de los nutrientes y

la lámina de riego, pues si no se administraba un riego adecuado, se generaba elevados consumos de fertilizantes originando mayores gastos en el presupuesto de fertilización. Sumado a ello, también se tuvo que cambiar la mentalidad de las personas que manejaban el sistema, pues al no estar familiarizados con la forma de trabajar se tenía mucha desconfianza en hacer los cambios.

Por este motivo, se profundizó en mostrar la diferencia y explicar los beneficios que se tenían al realizar los cambios propuestos. Tal como se aprecia en la figura 6 y 7, la CE en una distribución cuantitativa eleva la concentración por poco tiempo ya que todo el fertilizante está viajando en un volumen de agua reducido, esto según las condiciones del campo podría facilitar los lavados de fertilizante ya que hay más tiempo regando con agua pura que fertilizando netamente; además, distribuye de manera heterogénea la CE en el perfil del suelo. Por otro lado, la distribución proporcional distribuye todo el fertilizante en el volumen total de riego lo que homogeniza la distribución de la CE en el perfil del suelo y administra fertilizante a bajas concentraciones en todo momento del riego (Figura 7).

Es decir, regando por concentración tenemos una conductividad más confortable para el cultivo durante todo el tiempo de riego y esto genera una distribución homogénea de los nutrientes en el bulbo de riego. En cambio, regando por la distribución cuantitativa tenemos una conductividad alta durante un tiempo corto y agua pura en un tiempo más prolongado y esto genera un efecto de lavado que desencadena una distribución heterogénea de los nutrientes en el bulbo de riego. Estas observaciones fueron claves para determinar las estrategias de fertirriego según los tipos de suelo, en los suelos más arenosos los efectos de lavado eran más intensos mientras que en los suelos pesados eran menos perceptibles.

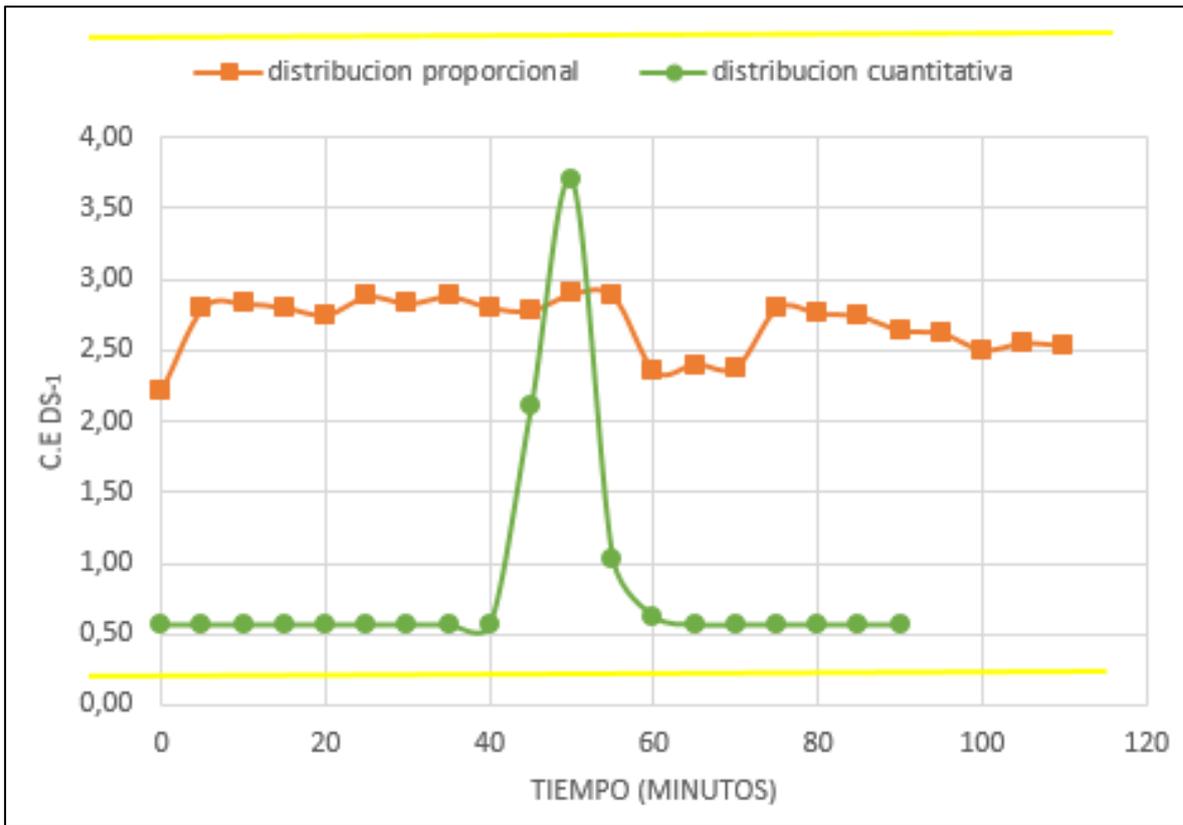


Figura 9. Comparación de la conductividad eléctrica (CE) en dS m-1 entre la distribución cuantitativa y proporcional

3.2.1 Demanda de nutrientes

La mayoría de los capsicums tienen una demanda nutricional similar que depende básicamente del rendimiento esperado. El ajuste de las cantidades de nutrientes y demanda hídrica depende del tiempo que dura el ciclo del cultivo, aunque muchas veces coincide que los cultivos de mayor ciclo de duración tienen mayores rendimientos y los cultivos de corta duración rinden menos, también hay casos de cultivos de corta duración con rendimientos altos o intermedios.

Por esta razón se implementó un factor de inyección de fertilizante basado en la cantidad total de agua y nutrientes que se espera gastar en la campaña. Este factor, para el caso de la mayoría de los pimientos, estaba entre 30 y 40% de la solución nutritiva total, es decir, si estaba recomendado 10 mEq N L^{-1} con un factor de inyección del 30% se estaría aplicando 3 mEq N L^{-1} . Para llegar a estos valores se revisaba el requerimiento de N del cultivo para la campaña que podía ser por ejemplo 300 kg, y se comparaba con la proyección de nitrógeno

gastado si se usaba la solución al 100% de su concentración con en el volumen de agua total de la campaña. Considerando este factor, se realizaron los ajustes correspondientes

La demanda de nutrientes de los cultivos se obtuvo de un trabajo de extracción, para el cual se envió al laboratorio plantas completas para analizar la materia seca de cada órgano y se obtuvo la concentración de nutrientes en la materia seca de los mismos (Figura 8), lo que permitió ajustar la tabla de extracción de nutrientes y observar la distribución de ellos en los órganos de las plantas y su dinámica a lo largo de su ciclo de vida. Así como lo refieren Bar-Yosef (1999) y Bertsch (2009), con estas concentraciones y el peso de las plantas se puede calcular la demanda de un cultivo, considerando algunos datos adicionales como la densidad del cultivo, el rendimiento y las eficiencias agronómicas en la aplicación, un ejemplo didáctico se puede apreciar en la tabla 8.

Tabla 8. Reporte de la concentración de nutrientes en la materia seca en los diferentes órganos de la planta

RAIZ		MACRO - ELEMENTOS						
MUESTRA	N	P	K	Na	Ca	Mg	S	Ci
	g/100	g/100	g/100	g/100	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g
	g	g	g	g				
PEPPADEW	2,55	0,24	1,29	0,09	2,94	0,13	0,38	0,34

TALLO		MACRO - ELEMENTOS						
MUESTRA	N	P	K	Na	Ca	Mg	S	Ci
	g/100	g/100	g/100	g/100	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g
	g	g	g	g				
PEPPADEW	0,76	0,06	0,66	0,05	0,4	0,06	0,07	0,35

HOJAS		MACRO - ELEMENTOS						
MUESTRAS	N	P	K	Na	Ca	Mg	S	Ci
	g/100	g/100	g/100	g/100	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g
	g	g	g	g				
PEPPADEW	3,89	0,28	2,99	0,01	1,35	0,39	0,51	0,68

FRUTOS		MACRO - ELEMENTOS						
MUESTRA	N	P	K	Na	Ca	Mg	S	Ci
	g/100	g/100	g/100	g/100	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g
	g	g	g	g				
INMADURO	2,04	0,35	2,16	0,01	0,1	0,17	0,24	0,74
MADURO	2,14	0,36	2,29	0,01	0,1	0,17	0,23	0,73

Tabla 9. Cálculo del peso de una planta y acumulación de nutrientes ideal de pimiento Peppadew

ÓRGANO	PESO	PESO	HUMEDAD	AGUA	MACROELEMENTOS, Cl y Na (g)							
	FRESCO	SECO			(%)	(g)	N	P	K	Na	Ca	Mg
Raíz	33	13.19	60.03	19.81	0.34	0.03	0.17	0.01	0.39	0.02	0.05	0.04
Tallo	1821	667.07	63.37	1153.93	5.07	0.40	4.40	0.33	2.67	0.40	0.47	2.33
Hojas	518	135.92	73.76	382.08	5.29	0.38	4.06	0.01	1.83	0.53	0.69	0.92
Fruto inmaduro	489	53.75	89.01	435.25	1.10	0.19	1.16	0.01	0.05	0.09	0.13	0.40
Fruto maduro	1189	178.78	84.96	1010.22	3.83	0.64	4.09	0.02	0.18	0.30	0.41	1.31
TOTAL				3001.29	15.62	1.64	13.89	0.38	5.12	1.34	1.75	5.01

3.2.3 Demanda hídrica

Las necesidades de riego en los pimientos antes de los ajustes estaban calculadas con la fórmula de la lámina de riego basada en que un buen riego mantiene el suelo con abundante agua, lo cual no es necesariamente correcto. En muchos casos zonas con excesiva humedad podrían ser perjudiciales para el desarrollo de las plantas.

Como indica Pizarro (1996) se cambió la mentalidad de conocer el contenido de humedad para que la planta pueda extraer el recurso hacia la energía con que el agua es retenida por el suelo porque de nada sirve que un suelo contenga agua abundante si las raíces no tienen fuerza de succión para extraerla.

Este concepto errado que manejábamos no permitía una completa interpretación de la necesidad de riego, pues sólo se calculaba la cantidad de agua que necesitaban las plantas sin considerar la capacidad de almacenamiento del suelo hasta la profundidad explorada por las raíces, lo que generaba pérdidas no contabilizadas y asumidas como parte del consumo de la planta, como la información de consumo de agua que se manejaba en el pimiento Jalapeño (Tabla 8). Para mejorar este punto se evaluó la profundidad del riego y se comparó con la profundidad de las raíces, observándose que las raíces crecían abundantemente hasta los 30 cm y podían profundizar hasta los 40 cm; sin embargo, la profundidad del riego podía llegar hasta un metro de profundidad.

La estrategia aplicada fue calcular el volumen de agua disponible que el suelo puede almacenar hasta la profundidad de las raíces del cultivo, este volumen sería nuestra cantidad de agua a reponer en el riego. Se aseguró que las láminas aplicadas y las frecuencias entre riegos sean las correctas a través de la observación del nivel de humedad en el perfil del suelo y la respuesta de la planta; así como Ferreyra *et al.* (2005) también lo reporta. Para ello se trabajó con tensiómetros, calicatas y medidores de humedad. Todas estas consideraciones llevaron a ajustes que permitieron determinar una lámina de agua disponible de 2 mm, es decir, cada riego que exceda este valor estaría colocando agua fuera del alcance de las raíces.

Con esta información se aumentó la eficiencia de uso de agua, ya que antes de determinarla si se debían regar 6 mm, el riego se repartía en láminas de 3 mm que excedían los 2 mm de capacidad de almacenamiento del suelo hasta la profundidad de las raíces y el milímetro restante se depositaba fuera de la zona de raíces, lo que representa aproximadamente el 30%

del agua usada. En algunos casos se programaban riegos adicionales después de evaluar la humedad de los campos o advertir síntomas de estrés hídrico.

Esta información nos ayudó a replantear el manejo y a no considerar como única prioridad el volumen de agua que demanda el cultivo sino también la cantidad de agua que almacena el suelo regable y la frecuencia con la que la consume la planta. Gracias a este manejo se pudo reducir un 25% la cantidad de agua utilizada en el primer año y 20% adicional al segundo año.

Tabla 10. Consumo de agua durante la campaña de pimiento Jalapeño

CONSUMO	MES						
	1	2	3	4	5	6	7
m ³ semanales	779	532	1 169	1 293	1 680	1 530	650
m ³ acumulados	779	1 311	2 479	3 772	5 452	6 982	7 632
m ³ ha ⁻¹ presupuesto	9 974	9 974	9 974	9 974	9 974	9 974	9 974

3.1.3 Parámetros de monitoreo

Para monitorear el manejo de la nutrición de los cultivos se estableció parámetros para las variables evaluadas en el suelo, en la solución fertirriego y en el cultivo.

a. En el suelo

- Porcentaje de humedad volumétrica (% Hv), que para el tipo de suelo franco arenoso debía estar entre 25 y 35%, valor que se estableció a través de adaptaciones con prueba y error.
- Conductividad eléctrica (CE) en dS m⁻¹, que si bien no tenía un valor fijo debía mantener una tendencia con valores mayores entre los 10 y 25 primeros centímetros del perfil que a los 40 cm.
- El pH, que en la medida de lo posible no debería ser mayor de 7.5 y con ayuda de un medidor se tomaban puntos de muestreo a profundidades de 10, 25 y 40 cm.

La figura 9 muestra la distribución de la conductividad eléctrica (CE) en dS m⁻¹ y el pH en el bulbo de riego, en ella se puede apreciar que la CE se incrementa conforme el punto de evaluación se aleja del gotero y los primeros centímetros del perfil tiene

un mayor contenido de sales, lo que sugiere que el fertirriego fue reciente y aún no se ha distribuido en el perfil.

b. En la solución fertirriego

Se colocaron recipientes de un litro debajo de los goteros.

- El pH, que debía estar entre 5.5 y 6 para evitar disminuir la disponibilidad de nutrientes.
- La CE en $dS\ m^{-1}$ dependía de la solución nutritiva empleada, del porcentaje de inyección ajustado y el volumen de agua colectado, con esto se coteja que el cumplimiento de lo programado con respecto a lo ejecutado. Se monitoreaba durante todo el riego para evitar los lavados de fertilizante (Figura 10).

Tabla 11. Registro de parámetros de monitoreo de la solución fertirriego (SFR) del Fundo Gandufresh 2018

	ETO	ETO DENTRO	FENOLOGIA	DDT	CE(G)	PH	GOTERO VOLUMEN (ml)	M3/ha
13 al 19 agos	3,96	2,96						
20 al 26 agos	4,00	3,00						
27 al 02 setie	3,84	2,84						
03 al 09 setie	4,00	3,00						
10 al 16 setie	4,17	3,17		2,00	1,63	9,20	373,30	12,44
17 al 23 setie	4,18	3,18	CRECIMIENTO VEGETATIVO	9,00	1,40	8,70	457,00	15,23
24 al 30 setie	4,31	3,31		16,00	2,80	7,70	400,00	13,33
01 al 07 octub	4,23	3,23	CRECIMIENTO VEGETATIVO	23,00	2,21	6,60	614,00	20,47
08 al 14 octub	4,32	3,32	ACELERADO, FLORACION, CUAJA Y DESARROLLO DE FRUTA	30,00	1,70	7,90	635,70	21,19
15 al 21 octub	4,48	3,48		37,00	1,76	8,10	664,30	22,14
22 al 28 octub	4,75	3,75		44,00	2,00	8,00	714,00	23,80
29 al 04 novie	4,70	3,70		51,00	2,10	8,00	742,85	24,76
05 al 11 novie	4,83	3,83		58,00	1,90	8,00	835,70	27,86
12 al 18 novie	4,85	3,85		65,00	2,00	7,50	707,14	23,57
19 al 25 novie	4,50	3,50		72,00	1,90	8,00	750,00	25,00
26 al 02 dicie	4,66	3,66	FLORACIÓN, CUAJA, DESARROLLO	79,00	2,10	7,30	721,00	24,05
03 al 09 dicie	4,84	3,84		86,00	2,00	7,20	871,40	29,05
10 al 16 dicie	5,08	4,08		93,00	1,75	7,00	942,80	31,43
17 al 23 dicie	4,43	3,43		100,00	1,60	7,20	785,70	26,19
24 al 30 dicie	4,64	3,64		107,00	1,70	6,90	857,00	28,57
31 al 06 ene	4,97	3,97		114,00	1,10	7,00	964,00	32,13

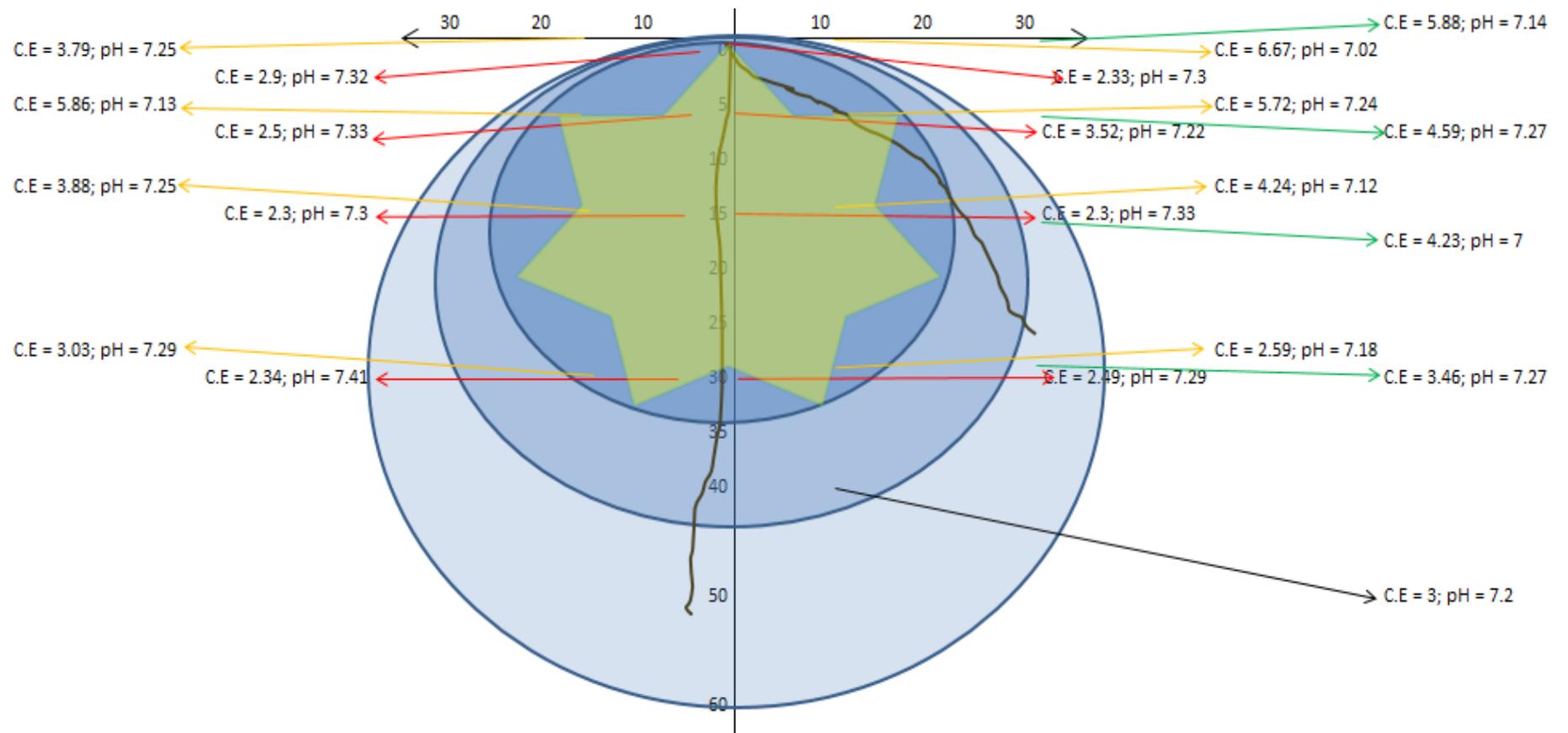


Figura 10. Distribución de la conductividad eléctrica (CE) en dS m⁻¹ y el pH en el bulbo de riego

c. En las plantas

Se usó una fenología con parámetros de crecimiento para cada cultivo, donde se conocía la tasa de crecimiento semanal del cultivo, en cuantas semanas debía florear, cuantos frutos podía cuajar, entre otros. Con esta información se facilitaba la observación de la respuesta de las plantas a los distintos cambios (Figura 11). La referencia de esta fenología tenía los datos del campo que mejor rendimiento que se había producido durante todos los años que se había sembrado la variedad, sin embargo observamos que algunos indicadores eran importantes pero no determinantes a la hora de comparar los resultados, como por ejemplo la altura de la planta, que se asocia al desarrollo vegetativo y es importante para producir más frutos pero lo que realmente fue determinante tuvo que ver con el equilibrio entre crecer y cuajar los frutos que estaba más asociado al desarrollo generativo de las plantas. En la figura 11 se puede ver un ligero aumento de la altura de planta, pero un drástico aumento en la cantidad total de frutos totales, y esto se debió a que las plantas no solo estaban creciendo en altura, sino que también estaban translocando más eficientemente sus nutrientes durante la floración.

3.3 ETAPA III: COMPARACIÓN

La principal diferencia entre la fertirrigación tradicional y la fertirrigación proporcional está en la oportunidad al momento de la distribución de los nutrientes; en este sentido, la fertilización proporcional lleva ventaja porque contiene a todos los nutrientes disponibles oportunamente y de fácil absorción para la planta. Sin embargo, el nivel de exigencia técnica para la correcta ejecución del plan es mayor, ya que exige no sólo precisión en el diseño de las soluciones nutritivas sino también en la hidráulica del sistema para aplicarlas correctamente y el constante monitoreo de los parámetros antes mencionados.

En la tabla 9 se muestra como mejora la eficiencia de uso de agua y fertilizantes desde el 2015 hasta el 2019, si bien los rendimientos no varían significativamente el consumo de agua y fertilizantes sí. Los años 2015 y 2016 se trabajaron con el fertirriego cuantitativo, a partir del 2017 se usó la fertilización proporcional.

Se observa también que en el 2015 para producir 1 tonelada de pimiento morrón se requería aproximadamente 200 m³ de agua y 7 unidades de nitrógeno 4.5 de fosforo y 9 de potasio, mientras que en el 2019 solo se requirió 133 m³ de agua 5 unidades de nitrógeno, 1.7 de

fosforo y 3.6 de potasio, aunque es importante aclarar que este cuadro solo considera las unidades consumidas como aporte de fertilizante sin incluir los aportes del suelo y el agua de riego, esto puede variar las cantidades de los nutrientes más abundantes en ellos como el potasio y el fosforo en el caso del suelo, y del calcio y el magnesio en el agua.

Tabla 12. Comparativo de consumo de agua y fertilizantes en pimiento Morrón desde el 2015 hasta el 2019

AÑO	TURNO	Rdto (kg)	AGUA (m³)	N	P₂O₅	K₂O	CaO	OBSERVACIONES
					(g)			
2015	SP-M1T05	46 373	9 402	329	210	435	217	
2016	SP-M1T06	16 373	3 402	129	57	135	67	se lo llevo el huayco
2017	SP-M2T02	40 025	7 781	233	97	243	149	
2018	SP-M3T06	68 614	10 941	297	165	391	97	se hizo rebrote
2019	SP-M1T05	48 592	6 485	246	80	175	156	

Fuente: Elaboración propia

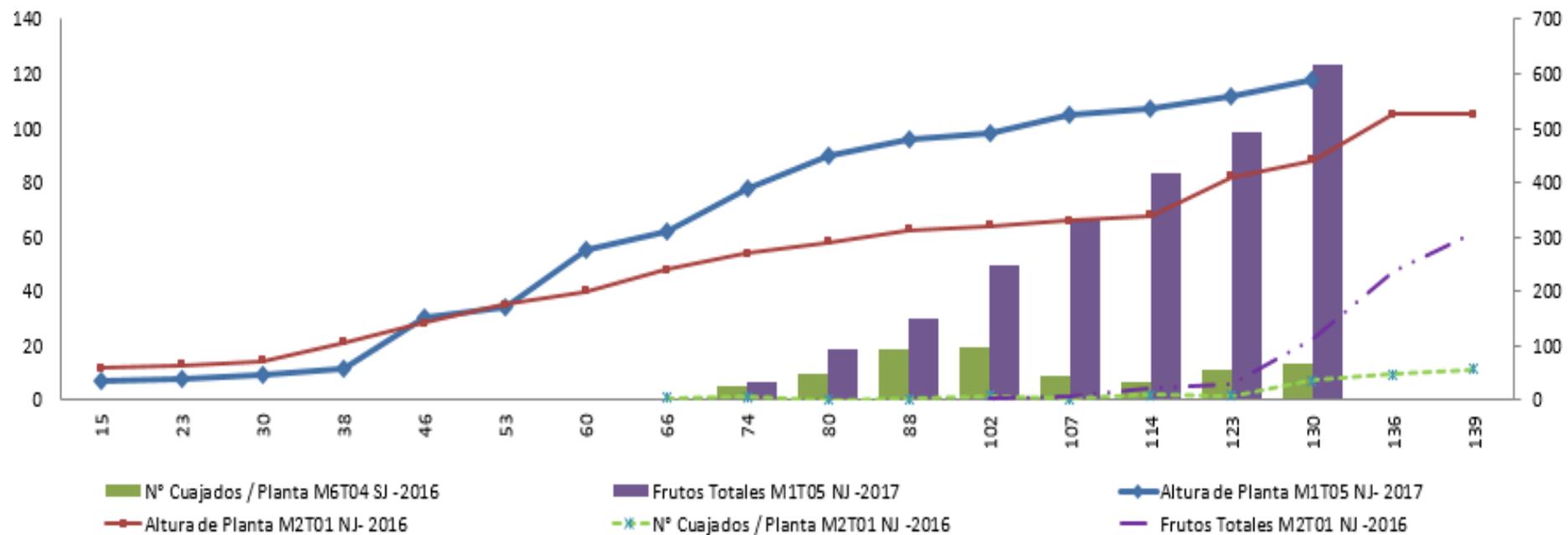


Figura 11. Fenología Lagrima rojo M2T5 campaña 2017-2018 vs Lagrima rojo M1T4 2016 - 2017

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La fertilización proporcional mejoró considerablemente la eficiencia de uso de agua y fertilizantes en la empresa gandules durante los años de su implementación, debido a que mantuvo el equilibrio entre la concentración de los nutrientes en el agua de riego y la homogeneidad en la distribución de los nutrientes en el volumen de suelo que contenía a las raíces.

Estos dos factores facilitaron la disponibilidad de los nutrientes a nivel de cantidades suficientes, concentraciones equilibradas y distribuciones homogéneas, generando así que las plantas usen menos energía para consumir agua y nutrientes permitiendo el uso de esta energía en otras funciones fisiológicas como generar tejidos asociados al desarrollo de órganos productivos.

V. CONCLUSIONES

- Se dio a conocer cómo se realizó el cambio de fertilización cuantitativa a proporcional de forma exitosa porque ayudó a alcanzar mejores rendimientos con un uso eficiente de agua y fertilizantes en la empresa Gandules.
- Las herramientas de evaluación descritas fueron prácticas, fáciles de ejecutarse en campo y eficientes en el monitoreo de la fertilización proporcional y nutrición de los cultivos.
- Los procesos de la implementación fueron detallados y las herramientas usadas son compartidas en este trabajo.

VI. RECOMENDACIONES

Para la implementación de un manejo de fertilización proporcional con soluciones nutritivas es importante tener en cuenta tres puntos claves para una ejecución exitosa:

- Un equipo de inyección que dosifique correctamente la solución porque es importante para garantizar una concentración de nutrientes homogénea durante el riego y también en el bulbo de riego, lo que facilita la absorción de nutrientes y evita la competencia entre iones.
- Verificar que los tanques de solución madre contengan las concentraciones correctas de las fuentes usadas y estén sin precipitados porque ayuda a obtener una mayor eficiencia en el uso de fertilizantes al evitar pérdidas por precipitados.
- Monitorear los parámetros de riego durante los riegos porque nos garantiza que la operación está ejecutándose correctamente ya que se puede verificar realmente la distribución de nutrientes tanto en el agua de riego como en el bulbo de riego.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Avidan, A. (1994). *Determinación del régimen de riego de los cultivos: Fascículo 3 - Cálculo de las necesidades de riego*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural del Estado de Israel, Sociedad para la Transferencia de Tecnología (HAIGUD) y Centro de Cooperación Internacional para el Desarrollo Agrícola (CINADCO).
- Bar-Yosef, B. (1999). Advances in Fertigation. En D. L. Sparks (Ed.) *Advances in Agronomy*, (65), 1-77. Academic Press.
- Bertsch, F. (2009). *Absorción de nutrimentos por los cultivos*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS).
- Burt, C. M. (2019). *Fertigation*. Irrigation Training and Research Center, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California, USA.
- Ferreya E., Raúl, Sellés V., Gabriel, Ahumada B., Rodrigo, Maldonado B., Patricio y Gil M., Pilar. (2005). *Manejo del riego localizado y fertirrigación*. Boletín INIA N° 126. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, La Cruz, Chile.
- INTAGRI. (2022). Crecimiento vegetativo y crecimiento generativo en tomate. *Serie Horticultura Protegida*, (46). <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/crecimiento-vegetativo-y-crecimiento-generativo-en-tomate#>
- Kafkafi, U. y Tarchitzky, J. (2012). *Fertirrigación: Una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua*. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA) e Instituto Internacional de la Potasa (IIP).
- Mmolawa, K. y Or, D. (2000). Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. *Plant and Soil* (222), 163–190. <https://doi.org/10.1023/A:1004756832038>
- Pizarro, F. (1996). *Riegos localizados de alta frecuencia: Goteo, microaspersión, exudación*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Vidal, I. (2019). *Fertirrigación: Desde la teoría a la práctica*. Universidad de Concepción.

ANEXOS

Anexo N° 1. Escenario actual

Fuente de agua	Horas de uso	Q (L s ⁻¹)	m ³ dia ⁻¹	CE (dS m ⁻¹)	pH	CATIONES (mEq L ⁻¹)					ANIONES (mEq L ⁻¹)							RAS	
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Suma de cationes	NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₂ PO ₄ ⁻		Suma de aniones
B11 rio		25,0	0,0	0,53	8,4	2,54	1,59	0,05	1,21	0,00	5,39	0,03	1,20	0,72	2,88	0,00	0,03	4,86	0,84
B10 rio		12,0	0,0	0,53	8,4	2,54	1,59	0,05	1,21	0,00	5,39	0,03	1,20	0,72	2,88	0,00	0,03	4,86	0,84
PETAR		28,0	2217,6	4,29	9,3	6,93	8,05	1,05	26,51	0,00	42,54	0,13	2,16	28,43	0,56	9,41	0,95	41,64	9,69
P1		25,0	0,0	5,56	6,8	4,99	6,10	0,00	38,78	0,00	49,87	0,05	0,00	26,39	10,84	18,42	0,06	55,76	16,47
P2		22,0	0,0	4,35	7,3	5,69	4,97	0,00	29,64	0,00	40,30	0,98	0,00	21,16	11,24	10,47	0,00	43,85	12,84
P3		20,0	0,0	2,75	7,2	8,98	5,98	0,04	16,69	0,00	31,69	0,47	0,00	13,04	7,65	7,79	0,00	28,95	6,10
P4		9,0	0,0	2,21	7,5	6,34	4,20	0,03	10,56	0,00	21,13	0,18	0,00	11,87	5,60	4,53	0,00	22,18	4,60
P5		10,0	0,0	2,86	7,5	9,35	6,87	0,00	10,87	0,00	27,09	2,19	0,00	13,68	6,04	6,99	0,00	28,90	3,82
P6		10,0	0,0	0,78	7,2	3,45	1,77	0,00	2,72	0,00	7,94	0,19	0,00	1,54	5,28	1,03	0,00	8,04	1,68
P9		15,0	0,0	10,89	7,3	41,53	25,95	0,08	37,77	0,00	105,33	0,59	0,00	94,00	5,56	15,42	0,00	115,57	6,50
P10		10,0	0,0	0,50	7,0	2,79	1,03	0,00	0,96	0,00	4,78	0,05	0,00	0,56	3,68	0,00	0,22	4,51	0,69
P11		8,5	0,0	0,48	6,8	2,79	1,03	0,00	0,96	0,00	4,78	0,05	0,00	0,56	3,68	0,00	0,22	4,51	0,69
Posmosis		30,0	0,0	0,06	6,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua Base (reservorio)		25,7	2218	4,3	9,3	6,9	8,1	1,1	26,5	0,0	42,5	0,1	2,2	28,4	0,6	9,4	1,0	41,6	9,69