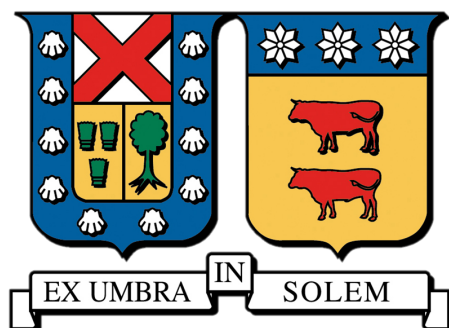




**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS**

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO OPERACIONAL  
Y MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD PARA UN  
SISTEMA DE RIEGO AGRÍCOLA EN GARCÉS FRUIT**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL**

**AUTOR**

**ANA PAULA CATALINA AHUMADA OLIVARES**

**PROFESOR GUÍA**

**DR. RODRIGO MENA BUSTOS**

**PROFESOR CO-REFERENTE**

**DAVID GODOY RAMOS**

**SANTIAGO DE CHILE, AGOSTO 2026**



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):** ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado  
DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO OPERACIONAL Y MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA  
CONFIABILIDAD PARA UN SISTEMA DE RIEGO AGRÍCOLA EN GARCÉS FRUIT.

**Título del trabajo:** \_\_\_\_\_

**Nombre del candidato(a):** \_\_\_\_\_ ANA AHUMADA OLIVARES

**Carrera / Grado:** \_\_\_\_\_ INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL

**Campus:** \_\_\_\_\_ VITACURA **Departamento:** \_\_\_\_\_ INDUSTRIAS

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, \_\_\_\_\_ RODRIGO MENA BUSTOS \_\_\_\_\_, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a)  
del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**

---

---

---

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** \_\_\_\_\_ 3 de agosto de 2026 **Firma:** \_\_\_\_\_

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** \_\_\_\_\_ 29 de julio de 2026 **Firma:** \_\_\_\_\_

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

# Agradecimientos

A mi mamá, gracias por inspirarme todos los días y hacerme sentir que nada es imposible. Mucho de la persona que soy hoy, nace de ti. Gracias por estar siempre.

A Antonia, gracias por tu compañía, por escucharme y por recordarme, muchas veces sin darte cuenta, que no tenía que vivir este proceso sola.

A Caro, por escucharme incluso cuando no entendías nada de mi carrera ni de esta tesis. Gracias por acompañarme en todas mis etapas y versiones.

A mis amigos. Anto, Nico y Franco, gracias por su apoyo constante y por estar ahí en momentos de estrés, dudas y decisiones importantes. Gracias por acompañarme en este camino universitario y por hacerlo todo más bonito y liviano.

A mi familia, a mis amigas, a Fabi y a Nus, gracias por ser parte de mi vida y por acompañarme, de una u otra forma, en este proceso.

Los quiero mucho.

Gracias, gracias, gracias.

## Tabla de Contenidos

|          |                                                                |           |
|----------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Resumen</b>                                                 | <b>9</b>  |
| <b>2</b> | <b>Introducción</b>                                            | <b>12</b> |
| <b>3</b> | <b>Problema de Investigación</b>                               | <b>16</b> |
| <b>4</b> | <b>Objetivos</b>                                               | <b>19</b> |
| 4.1      | Objetivo General . . . . .                                     | 19        |
| 4.2      | Objetivos Específicos . . . . .                                | 19        |
| <b>5</b> | <b>Alcance</b>                                                 | <b>21</b> |
| <b>6</b> | <b>Marco Teórico</b>                                           | <b>23</b> |
| 6.1      | Riego agrícola y requerimientos hídricos del cultivo . . . . . | 23        |
| 6.2      | Evapotranspiración y demanda hídrica . . . . .                 | 24        |
| 6.3      | Programación del riego . . . . .                               | 26        |
| 6.4      | Sistemas de riego presurizado . . . . .                        | 28        |
| 6.5      | Variables hidráulicas y operacionales del riego . . . . .      | 31        |
| 6.6      | Desempeño operacional y diagnóstico de desviaciones . . . . .  | 33        |
| 6.7      | Gestión de activos físicos e información documentada . . . . . | 35        |
| 6.8      | Mantenimiento en sistemas de riego . . . . .                   | 36        |
| 6.9      | Criticidad y priorización para mantenimiento . . . . .         | 39        |
| 6.10     | Mantenimiento Centrado en Confiabilidad . . . . .              | 40        |
| 6.11     | Las siete preguntas del RCM . . . . .                          | 43        |

|          |                                                                              |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.12     | Aplicación del RCM en sistemas de riego . . . . .                            | 45        |
| <b>7</b> | <b>Metodología</b>                                                           | <b>48</b> |
| 7.1      | Enfoque metodológico . . . . .                                               | 48        |
| 7.2      | Fase 0: diagnóstico y priorización . . . . .                                 | 51        |
| 7.2.1    | Delimitación del sistema y contexto operacional . . . . .                    | 51        |
| 7.2.2    | Jerarquía de activos y unidad de análisis . . . . .                          | 52        |
| 7.2.3    | Fuentes de información operacional y antecedentes de terreno . . . . .       | 55        |
| 7.2.4    | Construcción de la base operacional sector-día . . . . .                     | 57        |
| 7.2.5    | Definición de la precipitación de referencia operacional . . . . .           | 59        |
| 7.2.6    | Clasificación de desviaciones operacionales . . . . .                        | 60        |
| 7.2.7    | Verificación de consistencia caudal-precipitación . . . . .                  | 62        |
| 7.2.8    | Fugas de contador . . . . .                                                  | 64        |
| 7.2.9    | Eventos operacionales de terreno . . . . .                                   | 64        |
| 7.2.10   | Puntaje operacional sector-día . . . . .                                     | 67        |
| 7.2.10.1 | Ponderación del patrón. . . . .                                              | 67        |
| 7.2.10.2 | Componentes complementarios. . . . .                                         | 68        |
| 7.2.10.3 | Origen de las ponderaciones. . . . .                                         | 69        |
| 7.2.10.4 | Alcance del puntaje. . . . .                                                 | 69        |
| 7.2.11   | Agregación semanal y ranking operacional de equipos . . . . .                | 70        |
| 7.2.12   | Análisis de asociación entre eventos de terreno y patrones operacionales . . | 71        |
| 7.2.13   | Criterios de selección de equipos para análisis RCM . . . . .                | 74        |
| 7.3      | Aplicación de la metodología RCM mediante las siete preguntas . . . . .      | 75        |

|          |                                                                           |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>8</b> | <b>Resultados</b>                                                         | <b>79</b> |
| 8.1      | Resultados de la Fase 0: diagnóstico y priorización . . . . .             | 79        |
| 8.1.1    | Caracterización general del diagnóstico operacional . . . . .             | 79        |
| 8.1.2    | Ranking operacional de equipos . . . . .                                  | 80        |
| 8.1.3    | Ranking complementario de eventos operacionales de terreno . . . . .      | 81        |
| 8.1.4    | Asociación entre eventos de terreno y patrones operacionales . . . . .    | 82        |
| 8.1.5    | Priorización integrada y selección de equipos para análisis RCM . . . . . | 84        |
| 8.2      | Funciones del equipo de riego y estándares de desempeño . . . . .         | 86        |
| 8.3      | Desglose RCM en Equipo 7 . . . . .                                        | 87        |
| 8.3.1    | Antecedentes . . . . .                                                    | 87        |
| 8.3.2    | Lectura sectorial del caso . . . . .                                      | 88        |
| 8.3.3    | Funciones y fallas funcionales . . . . .                                  | 89        |
| 8.3.4    | Modos de falla probables . . . . .                                        | 90        |
| 8.3.5    | Efectos, consecuencias y tareas recomendadas . . . . .                    | 91        |
| 8.3.6    | Hallazgos principales del Equipo 7 . . . . .                              | 92        |
| 8.4      | Desglose RCM en Equipo 4 . . . . .                                        | 93        |
| 8.4.1    | Antecedentes . . . . .                                                    | 93        |
| 8.4.2    | Lectura sectorial del caso . . . . .                                      | 94        |
| 8.4.3    | Funciones y fallas funcionales . . . . .                                  | 95        |
| 8.4.4    | Modos de falla probables . . . . .                                        | 95        |
| 8.4.5    | Efectos, consecuencias y tareas recomendadas . . . . .                    | 97        |
| 8.4.6    | Hallazgos principales del Equipo 4 . . . . .                              | 97        |
| 8.5      | Desglose RCM en Equipo 5 . . . . .                                        | 98        |

|           |                                                                            |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.5.1     | Antecedentes . . . . .                                                     | 98         |
| 8.5.2     | Lectura sectorial del caso . . . . .                                       | 99         |
| 8.5.3     | Funciones y fallas funcionales . . . . .                                   | 100        |
| 8.5.4     | Modos de falla probables . . . . .                                         | 100        |
| 8.5.5     | Efectos, consecuencias y tareas recomendadas . . . . .                     | 101        |
| 8.5.6     | Hallazgos principales del Equipo 5 . . . . .                               | 101        |
| 8.6       | Desglose RCM en Equipo 2 . . . . .                                         | 102        |
| 8.6.1     | Antecedentes . . . . .                                                     | 102        |
| 8.6.2     | Lectura sectorial del caso . . . . .                                       | 103        |
| 8.6.3     | Funciones y fallas funcionales . . . . .                                   | 104        |
| 8.6.4     | Modos de falla probables . . . . .                                         | 104        |
| 8.6.5     | Efectos, consecuencias y tareas recomendadas . . . . .                     | 105        |
| 8.6.5.1   | Nota sobre la trazabilidad. . . . .                                        | 105        |
| 8.6.6     | Hallazgos principales del Equipo 2 . . . . .                               | 106        |
| 8.7       | Selección de tareas mediante la lógica de decisión RCM . . . . .           | 106        |
| 8.7.1     | Clasificación de las consecuencias . . . . .                               | 107        |
| 8.7.2     | Árbol de decisión de tareas . . . . .                                      | 107        |
| 8.8       | Plan consolidado de tareas de mantenimiento . . . . .                      | 109        |
| 8.8.1     | La revisión de superficies como tarea de mantenimiento de la información . | 112        |
| <b>9</b>  | <b>Conclusiones</b>                                                        | <b>115</b> |
| <b>10</b> | <b>Discusión</b>                                                           | <b>121</b> |
| 10.1      | El diagnóstico como puerta de entrada al RCM . . . . .                     | 121        |

|           |                                                                                    |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.2      | Dos capas complementarias . . . . .                                                | 121        |
| 10.3      | Falla del activo frente a falla de la información . . . . .                        | 123        |
| 10.4      | Aporte a la política de mantenimiento del campo . . . . .                          | 124        |
| 10.5      | Registro estructurado de intervenciones: la hoja de vida del equipo . . . . .      | 125        |
| 10.6      | De un sistema de monitoreo a una lógica de diagnóstico operacional escalable . . . | 128        |
| 10.6.1    | Frecuencias diferenciadas de revisión e intervención . . . . .                     | 129        |
| 10.6.2    | Direcciones de desarrollo del enfoque . . . . .                                    | 129        |
| 10.6.3    | El rol potencial del diagnóstico asistido . . . . .                                | 130        |
| <b>11</b> | <b>Limitaciones</b>                                                                | <b>132</b> |
| <b>12</b> | <b>Anexos</b>                                                                      | <b>136</b> |
| 12.1      | Anexo A: Plano general del sistema de riego . . . . .                              | 136        |
| 12.2      | Anexo B: Reproducibilidad del diagnóstico operacional . . . . .                    | 136        |
| 12.2.1    | Umbral utilizados . . . . .                                                        | 137        |
| 12.2.2    | Cálculo de variables base . . . . .                                                | 137        |
| 12.2.3    | Clasificación de caudal y precipitación operacional . . . . .                      | 140        |
| 12.2.4    | Consistencia caudal-precipitación . . . . .                                        | 141        |
| 12.2.5    | Puntaje operacional sector-día . . . . .                                           | 141        |
| 12.2.6    | Fugas de contador . . . . .                                                        | 143        |
| 12.2.7    | Puntaje recurrente operacional por equipo . . . . .                                | 143        |
| 12.2.8    | Ranking complementario de eventos operacionales de terreno . . . . .               | 146        |
| 12.2.9    | Procedimiento de cálculo . . . . .                                                 | 147        |
| 12.2.9.1  | Nivel sector-día. . . . .                                                          | 147        |

|          |                                                              |     |
|----------|--------------------------------------------------------------|-----|
| 12.2.9.2 | Nivel sector-semana. . . . .                                 | 147 |
| 12.2.9.3 | Nivel equipo. . . . .                                        | 148 |
| 12.2.9.4 | Ranking complementario de eventos. . . . .                   | 148 |
| 12.3     | Anexo C: Formato de hoja de vida de intervenciones . . . . . | 148 |

## Lista de Tablas

|    |                                                                                                                                                                |    |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Niveles jerárquicos del sistema y función dentro del análisis. . . . .                                                                                         | 55 |
| 2  | Criterios de clasificación para caudal y precipitación operacional. . . . .                                                                                    | 61 |
| 3  | Clasificación de consistencia entre caudal y precipitación operacional. . . . .                                                                                | 63 |
| 4  | Ponderación del patrón caudal-precipitación en el puntaje sector-día. . . . .                                                                                  | 68 |
| 5  | Rutas de selección para la aplicación del análisis RCM. . . . .                                                                                                | 74 |
| 6  | Siete preguntas del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad aplicadas al sistema<br>de riego. . . . .                                                          | 77 |
| 7  | Distribución de señales operacionales en el campo El Huaico. . . . .                                                                                           | 79 |
| 8  | Ranking operacional de equipos del campo El Huaico. . . . .                                                                                                    | 80 |
| 9  | Ranking complementario de eventos operacionales de terreno por equipo. . . . .                                                                                 | 81 |
| 10 | Asociación entre eventos de terreno y patrones operacionales a nivel sector-día en<br>El Huaico, considerando coincidencia en el mismo día del evento. . . . . | 82 |
| 11 | Equipos seleccionados para el análisis RCM y ruta de entrada. . . . .                                                                                          | 84 |
| 12 | Catálogo de funciones del equipo de riego, estándar de desempeño y evidencia de<br>evaluación. . . . .                                                         | 86 |
| 13 | Lectura sectorial del Equipo 7. . . . .                                                                                                                        | 89 |

|    |                                                                                  |     |
|----|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 14 | Estado de las funciones del Equipo 7 frente al catálogo común. . . . .           | 90  |
| 15 | Efectos, consecuencias y tareas recomendadas para el Equipo 7. . . . .           | 92  |
| 16 | Lectura sectorial del Equipo 4. . . . .                                          | 94  |
| 17 | Estado de las funciones del Equipo 4 frente al catálogo común. . . . .           | 95  |
| 18 | Efectos, consecuencias y tareas recomendadas para el Equipo 4. . . . .           | 97  |
| 19 | Lectura sectorial del Equipo 5. . . . .                                          | 99  |
| 20 | Estado de las funciones del Equipo 5 frente al catálogo común. . . . .           | 100 |
| 21 | Efectos, consecuencias y tareas recomendadas para el Equipo 5. . . . .           | 101 |
| 22 | Lectura sectorial del Equipo 2. . . . .                                          | 103 |
| 23 | Estado de las funciones del Equipo 2 frente al catálogo común. . . . .           | 104 |
| 24 | Efectos, consecuencias y tareas recomendadas para el Equipo 2. . . . .           | 105 |
| 25 | Tipología de consecuencias del RCM aplicada al sistema de riego. . . . .         | 107 |
| 26 | Plan consolidado de tareas de mantenimiento por equipo. . . . .                  | 110 |
| 27 | Tareas transversales recomendadas para el sistema de riego. . . . .              | 111 |
| 28 | Campos mínimos propuestos para la hoja de vida de intervenciones por equipo. . . | 126 |
| 29 | Umbrales utilizados en el diagnóstico operacional. . . . .                       | 137 |
| 30 | Clasificación de caudal y precipitación operacional. . . . .                     | 140 |
| 31 | Clasificación de consistencia caudal-precipitación. . . . .                      | 141 |
| 32 | Ponderaciones del puntaje operacional sector-día. . . . .                        | 142 |
| 33 | Ponderaciones del puntaje recurrente operacional por equipo. . . . .             | 145 |
| 34 | Ponderación de eventos operacionales según prioridad. . . . .                    | 146 |
| 35 | Criterio de interpretación de la prioridad de eventos operacionales. . . . .     | 146 |

## Lista de Figuras

|   |                                                                                                                                                                              |     |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1 | Variación típica del coeficiente de cultivo ( $K_c$ , adimensional) a lo largo del ciclo fenológico del cultivo, expresado en días. Adaptado de Allen et al. (1998). . . . . | 26  |
| 2 | Estructura funcional general de un sistema de riego por goteo, desde la fuente de agua hasta la aplicación mediante emisores. Elaboración propia. . . . .                    | 30  |
| 3 | Distribución general de los equipos de riego del campo El Huaico. . . . .                                                                                                    | 52  |
| 4 | Jerarquía de análisis del sistema de riego del campo El Huaico. Elaboración propia. . . . .                                                                                  | 54  |
| 5 | Árbol de decisión para la selección del tipo de tarea de mantenimiento. Elaboración propia con base en Moubray (1997). . . . .                                               | 108 |
| 6 | Plano general del sistema de riego del campo El Huaico. . . . .                                                                                                              | 136 |

## 1. Resumen

El presente trabajo desarrolla y aplica una metodología de diagnóstico operacional y priorización de mantenimiento para sistemas de riego agrícola presurizado, apoyada en el enfoque de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). El estudio se aplica al sistema de riego del campo El Huaico, perteneciente a Garcés Fruit, durante la temporada comprendida entre octubre de 2025 y abril de 2026. La problemática abordada surge de la necesidad de avanzar desde una gestión principalmente reactiva, basada en intervenciones posteriores a la aparición de problemas en terreno, hacia un enfoque estructurado que permita utilizar la información operacional disponible para orientar decisiones de mantenimiento.

La metodología propuesta incorpora una etapa previa al análisis RCM, denominada Fase 0, cuyo propósito es diagnosticar y priorizar los equipos antes de aplicar el análisis funcional en profundidad. Para ello, se consolidó una base operacional a nivel sector-día, integrando registros automáticos de riego, parámetros del Maestro de Riego, programación, fugas de contador y antecedentes de terreno. A partir de esta información se definieron indicadores asociados a caudal, precipitación operacional, cumplimiento del programa, fugas y eventos operacionales, permitiendo construir un ranking operacional de los diez equipos del campo y una segunda capa complementaria basada en eventos de terreno.

Los resultados muestran que ambas capas entregan información complementaria. El ranking operacional permite identificar señales recurrentes de desempeño operacional, mientras que la capa de eventos permite reconocer recurrencias de fallas e intervenciones que no siempre se reflejan como una degradación agregada del desempeño hidráulico. A nivel sector-día, los eventos de terreno se asociaron con mayor claridad a los patrones coherentes y de solo caudal, mientras

que las desviaciones de solo precipitación aparecieron subrepresentadas cerca de eventos. Esto evidencia que las desviaciones operacionales no tienen una única interpretación y que el diagnóstico debe distinguir entre señales compatibles con condiciones hidráulicas u operacionales detectables en terreno e inconsistencias asociadas a información o referencias de evaluación.

A partir de la priorización se seleccionaron cuatro equipos para el análisis RCM, cada uno representando una naturaleza distinta de problema. El Equipo 7 se asoció principalmente a una inconsistencia en la referencia de precipitación, sin evidencia dominante de falla física. El Equipo 4 correspondió a un caso de convergencia entre desempeño operacional, presión y eventos de terreno, vinculado principalmente a regulación de presión y contención. El Equipo 5 presentó una menor entrega hidráulica localizada en un sector específico, con desviación coherente entre caudal y precipitación. El Equipo 2, por su parte, evidenció recurrencia de fallas localizadas de componentes, principalmente válvulas, solenoides y elementos de control, sin una degradación agregada evidente del desempeño hidráulico.

La aplicación del RCM permitió traducir las señales operacionales en funciones, fallas funcionales, modos de falla probables, efectos, consecuencias y tareas de mantenimiento. Entre los principales aportes del trabajo se destaca la capacidad de diferenciar entre fallas del activo y fallas asociadas a la información utilizada para evaluarlo, evitando interpretar toda desviación operacional como una falla física confirmada. Finalmente, se propone un plan consolidado de tareas de mantenimiento que incluye tareas a condición, búsqueda de falla, corrección de referencias operacionales, revisión de información del Maestro de Riego y registro estructurado de eventos e intervenciones. La metodología desarrollada entrega una base reproducible para focalizar el mantenimiento en sistemas de riego agrícola presurizado, aunque su aplicación futura requiere validación en terreno, seguimiento de tareas y fortalecimiento progresivo del historial de eventos, interven-



ciones y costos reales.

## 2. Introducción

El riego cumple un rol fundamental en la producción agrícola, especialmente en contextos donde la disponibilidad natural de agua no es suficiente o no coincide temporalmente con los requerimientos hídricos del cultivo. Una gestión adecuada del riego permite aproximar la entrega de agua a las necesidades del cultivo, incidiendo directamente en su desarrollo, rendimiento y calidad (Allen et al., 1998). Por esta razón, el funcionamiento de los sistemas de riego no solo debe analizarse desde la disponibilidad del recurso hídrico, sino también desde la capacidad del sistema para aplicar el agua de manera oportuna, controlada y consistente.

En sistemas de riego presurizado, como el riego por goteo, esta capacidad depende de la interacción entre distintos elementos hidráulicos y operacionales. La programación del riego define cuánto y cuándo regar, mientras que la infraestructura del sistema permite ejecutar dicha programación en terreno. En este proceso intervienen componentes como bombas, filtros, válvulas, tuberías y emisores, cuyo desempeño influye directamente en la forma en que el agua se conduce, distribuye y aplica en cada sector (Keller y Bliesner, 1990).

Sin embargo, en la operación real pueden existir diferencias entre lo programado y lo efectivamente ejecutado. Estas diferencias pueden manifestarse en variables como caudal, tiempo de riego, lámina aplicada, precipitación operacional y cumplimiento del programa de riego. Si bien estas variables no explican por sí solas la causa de una desviación, sí permiten describir el comportamiento operacional del sistema y detectar señales que requieren análisis técnico. En este sentido, el monitoreo de variables operacionales constituye una base relevante para comprender si el sistema está cumpliendo su función principal: aplicar agua al cultivo en la cantidad, oportunidad y condiciones hidráulicas requeridas.

Desde la perspectiva del mantenimiento, este punto resulta especialmente relevante. Un sistema de riego no solo debe estar disponible para operar, sino que debe ser capaz de mantener un nivel de servicio compatible con las necesidades del cultivo. En la literatura se ha señalado que el mantenimiento en sistemas de riego ha recibido una atención limitada en comparación con su importancia operacional. En particular, Huppert et al. (2003) plantean que, aunque el mantenimiento diferido es reconocido como una causa relevante de déficits de desempeño, suele existir una baja priorización de este problema en la gestión de dichos sistemas.

En esta misma línea, Svendsen y Huppert (2003) señalan que el mantenimiento en riego no debe entenderse únicamente como la reparación de componentes físicos, sino como parte de un proceso orientado a sostener un determinado nivel de servicio. Esto es especialmente importante en sistemas agrícolas, donde el objetivo final no es solo que los equipos funcionen, sino que el agua llegue al cultivo en las condiciones requeridas. Por lo tanto, el análisis del mantenimiento debe considerar tanto la condición de los componentes como el desempeño operacional del sistema.

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, o Reliability Centered Maintenance (RCM), ofrece una estructura metodológica adecuada para abordar este tipo de problema, ya que permite analizar un sistema a partir de sus funciones, fallas funcionales, modos de falla, efectos, consecuencias y tareas de mantenimiento (Moubray, 1997). A diferencia de enfoques centrados exclusivamente en la reparación o sustitución de componentes, el RCM comienza por definir qué debe cumplir el sistema en su contexto operacional y luego analiza de qué manera puede dejar de cumplirlo.

No obstante, la aplicación del RCM en sistemas de riego agrícola ha sido poco desarrollada en comparación con otros sectores. Alves et al. (2015) destacan que existen pocas contribuciones orientadas a aplicar metodologías formales de mantenimiento al contexto específico de los sistemas

de riego, a pesar de la relevancia que estos tienen para la continuidad de la producción agrícola. Esta brecha resulta especialmente importante en contextos donde existen datos operacionales disponibles, pero su uso para apoyar decisiones de mantenimiento aún no se encuentra completamente estructurado.

En el caso de Garcés Fruit, los sistemas de riego agrícola cuentan con información proveniente de distintas fuentes operacionales y de terreno. Esta información permite observar variables asociadas a la ejecución del riego, tales como caudal, tiempo de riego, lámina aplicada, precipitación, eventos operacionales y antecedentes de mediciones en terreno. Sin embargo, la existencia de datos no garantiza por sí misma un diagnóstico claro. Para que estos registros apoyen efectivamente la gestión del mantenimiento, deben ser integrados, depurados e interpretados bajo una lógica que permita relacionar las desviaciones observadas con posibles fallas funcionales y modos de falla probables.

En función de lo anterior, esta memoria propone adaptar la lógica del RCM al análisis de un sistema de riego agrícola presurizado, utilizando información operacional disponible para detectar desviaciones, analizarlas como señales de posibles fallas funcionales y asociarlas a modos de falla probables y acciones de mantenimiento. El estudio se aplica al sistema de riego del campo El Huaico, perteneciente a Garcés Fruit, considerando el equipo de riego como activo mantenible, el sector como unidad funcional de operación y el sector-día como unidad mínima de observación operacional.

El principal aporte de esta investigación consiste en vincular el análisis funcional propio del RCM con indicadores operacionales observables del sistema de riego. De esta forma, las desviaciones en caudal, precipitación y cumplimiento del programa de riego no se tratan como fallas concluyentes por sí mismas, sino como señales operacionales que orientan el diagnóstico técnico.

Así, el trabajo busca transformar información disponible del sistema en una metodología estructurada de análisis, orientada a apoyar la toma de decisiones de mantenimiento en sistemas de riego agrícola presurizado.

### **3. Problema de Investigación**

En el caso de la empresa Garcés Fruit, el sistema de riego está compuesto por una red de equipos hidráulicos que incluyen bombas, válvulas, filtros, tuberías y emisores, los cuales deben operar de manera coordinada para asegurar el cumplimiento de los programas de riego definidos. En sistemas de riego presurizado, estos componentes influyen directamente en la conducción, distribución y aplicación del agua, por lo que su desempeño resulta determinante para alcanzar las condiciones de operación esperadas (Keller y Bliesner, 1990). A partir de los antecedentes levantados en el caso de estudio, se observa que la gestión del mantenimiento del sistema no se encuentra formalmente estructurada bajo una metodología de análisis funcional de fallas, modos de falla probables, causas probables y consecuencias.

Las intervenciones sobre los equipos se realizan principalmente de manera correctiva, es decir, una vez que los problemas se manifiestan en terreno. Adicionalmente, se ejecuta una actividad de mantenimiento preventivo general con una frecuencia anual, la cual no se encuentra necesariamente basada en el análisis de las funciones del sistema, las fallas funcionales, los modos de falla probables ni las consecuencias asociadas. Esta situación resulta relevante, ya que la literatura ha señalado que el mantenimiento en sistemas de riego no debe entenderse solo como la reparación de componentes físicos, sino como un proceso orientado a sostener un determinado nivel de servicio (Svendsen y Huppert, 2003). Como resultado, se limita la capacidad de anticiparse a fallas y se dificulta el diagnóstico de las desviaciones observadas en la operación del sistema.

A lo anterior se suma que el sistema está compuesto por múltiples equipos de riego, lo que vuelve impracticable aplicar un análisis de confiabilidad detallado a la totalidad de los activos de manera simultánea. Sin un criterio basado en evidencia para focalizar el análisis, la selección de los

equipos sobre los cuales concentrar la revisión queda sujeta principalmente al juicio del personal de terreno. Surge así la necesidad de un procedimiento que, a partir de los datos operacionales disponibles, permita priorizar sobre qué equipos concentrar el análisis antes de aplicar el análisis RCM en profundidad.

Esta situación genera, además, una alta dependencia del conocimiento y criterio del personal de terreno para interpretar la información disponible y tomar decisiones operacionales. La ausencia de una metodología estructurada que permita integrar los datos, analizar las fallas funcionales y formular causas probables limita la capacidad de gestión del sistema de riego bajo un enfoque de confiabilidad, entendido como la identificación de funciones, fallas funcionales, modos de falla probables, efectos, consecuencias y tareas de mantenimiento para la toma de decisiones (Moubray, 1997). En consecuencia, se evidencia una brecha entre la información disponible y su utilización efectiva para la toma de decisiones, lo que plantea la necesidad de desarrollar un enfoque sistemático que permita comprender el comportamiento operacional del sistema de riego y orientar su mantenimiento de manera más trazable y basada en evidencia.

Por lo tanto, surge la necesidad de abordar de manera estructurada la gestión de mantenimiento del sistema de riego, integrando la información disponible, priorizando los equipos relevantes y reduciendo la dependencia del análisis manual. Esta necesidad se relaciona con la escasa aplicación de metodologías formales de mantenimiento al contexto específico de sistemas de riego agrícola, a pesar de su relevancia para la continuidad operacional de la producción (Alves et al., 2015). En función de lo anterior, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cómo priorizar, a partir de los datos operacionales disponibles, los equipos de riego sobre los cuales concentrar el análisis de confiabilidad, considerando tanto su desempeño operacional como la recurrencia de eventos e intervenciones de terreno?

2. ¿Cómo adaptar la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) al análisis de un sistema de riego agrícola presurizado, utilizando información operacional disponible para apoyar la identificación de fallas funcionales, modos de falla probables y tareas de mantenimiento?
3. ¿Qué funciones y estándares de desempeño debe cumplir el sistema de riego del campo El Huaico en su contexto operacional?
4. ¿Qué desviaciones en variables como caudal, precipitación operacional y cumplimiento del programa de riego permiten orientar la identificación de posibles fallas funcionales a nivel de sector?
5. ¿Qué modos de falla probables, efectos, consecuencias y tareas de mantenimiento pueden definirse a partir de la relación entre las desviaciones observadas y la lógica del RCM?
6. ¿Qué condiciones de aplicabilidad y limitaciones presenta la metodología propuesta para sistemas de riego agrícola presurizado?

## **4. Objetivos**

### **4.1. Objetivo General**

Desarrollar y aplicar una metodología de diagnóstico operacional y priorización de mantenimiento para equipos de riego agrícola presurizado del campo El Huaico de Garcés Fruit, basada en variables operacionales del sistema y apoyada en el enfoque de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), con el fin de orientar la toma de decisiones de mantenimiento.

### **4.2. Objetivos Específicos**

1. Caracterizar el sistema de riego agrícola presurizado y su contexto operacional, identificando su estructura de activos, componentes principales, fuentes de información y condiciones de operación relevantes para el análisis de mantenimiento.
2. Definir las variables e indicadores operacionales utilizados para diagnosticar el desempeño del sistema de riego.
3. Construir un procedimiento de diagnóstico y priorización basado en datos operacionales, que permita integrar la información disponible, evaluar recurrencias y seleccionar los equipos más relevantes para el análisis de mantenimiento.
4. Aplicar el enfoque de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) a los equipos seleccionados, definiendo sus funciones, fallas funcionales, estándares de desempeño, modos de falla probables y consecuencias.
5. Determinar lineamientos y tareas de mantenimiento para los modos de falla probables identificados, utilizando la lógica de decisión del RCM y considerando tareas a condición, tareas

de búsqueda de falla, acciones por defecto, mantenimiento de la información y necesidades de registro operacional.

6. Evaluar la coherencia, pertinencia y condiciones de aplicabilidad de la metodología propuesta, identificando sus limitaciones y oportunidades de mejora para sistemas de riego agrícola presurizado.

## 5. Alcance

El presente trabajo se acota al sistema de riego agrícola presurizado del campo El Huaico, perteneciente a Garcés Fruit, durante la temporada comprendida entre octubre de 2025 y abril de 2026. El estudio considera los diez equipos de riego del campo para el diagnóstico operacional y la priorización inicial.

El análisis abarca la integración de información operacional disponible, incluyendo registros automáticos de riego, parámetros del Maestro de Riego, programación del riego y antecedentes de terreno. A partir de esta información, se definen variables e indicadores operacionales para evaluar el desempeño del sistema a nivel sector-día y equipo.

El trabajo incluye la priorización de equipos mediante una Fase 0 de diagnóstico operacional y la aplicación del análisis RCM en profundidad solo a los equipos seleccionados. Para estos equipos se identifican funciones, fallas funcionales, modos de falla probables, consecuencias y tareas de mantenimiento recomendadas.

El estudio no contempla la aplicación del análisis RCM en profundidad a la totalidad de los equipos del campo. Los equipos no seleccionados quedan caracterizados mediante el diagnóstico operacional, pero no son analizados en detalle mediante la metodología RCM.

El alcance tampoco incluye la ejecución física de las tareas de mantenimiento propuestas, la validación posterior de su efectividad en terreno ni el seguimiento de los equipos en temporadas futuras. Las tareas definidas corresponden a lineamientos de mantenimiento derivados del análisis realizado, no a un plan implementado y evaluado operacionalmente.

Asimismo, el trabajo no considera el desarrollo de software, la automatización del diagnóstico, la optimización en tiempo real de la operación del riego ni la evaluación agronómica de

la demanda hídrica del cultivo. La programación del riego se utiliza como referencia operacional, pero no se evalúa si dicha programación es agronómicamente adecuada.

El análisis económico se limita a una evaluación cualitativa y referencial de consecuencias. No se estiman costos reales de intervención, tasas de falla, tiempos medios entre fallas ni intervalos adecuados de mantenimiento, debido a la ausencia de un historial estructurado de fallas e intervenciones de temporadas anteriores.

Finalmente, los resultados específicos corresponden al campo El Huaico y no deben extrapolarse directamente a otros campos sin repetir el procedimiento sobre sus propias condiciones hidráulicas, estructura de activos, fuentes de información y prácticas operacionales. No obstante, la metodología propuesta puede ser replicada en otros sistemas de riego agrícola presurizado que cuenten con información operacional suficiente y trazabilidad entre equipos, sectores y registros de operación.

## **6. Marco Teórico**

### **6.1. Riego agrícola y requerimientos hídricos del cultivo**

El riego agrícola corresponde a la aplicación artificial de agua al suelo con el propósito de complementar las precipitaciones y satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo. Su importancia radica en que el agua participa en procesos fisiológicos esenciales para la planta, tales como la transpiración, el transporte de nutrientes, la regulación térmica y la formación de biomasa. Cuando el suministro hídrico disponible no permite cubrir la demanda del cultivo, pueden generarse condiciones de estrés que afectan el crecimiento, el rendimiento y la calidad del producto cosechado (Allen et al., 1998; Steduto et al., 2012).

Los requerimientos hídricos de un cultivo dependen de factores climáticos, edáficos, fisiológicos y de manejo. Entre ellos se encuentran la radiación solar, la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento, el tipo de cultivo, su estado fenológico, la profundidad efectiva de raíces, la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y la estrategia de riego definida. Por esta razón, la planificación del riego requiere estimar la demanda hídrica y, al mismo tiempo, considerar la capacidad del sistema para entregar el agua requerida bajo condiciones reales de operación.

La relación entre agua y producción agrícola ha sido abordada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) mediante funciones de respuesta del rendimiento al agua, en las cuales se reconoce que una reducción en la evapotranspiración real del cultivo puede traducirse en pérdidas de rendimiento, dependiendo de la sensibilidad del cultivo y de la etapa fenológica en que ocurre el déficit (Doorenbos y Kassam, 1979; Steduto et al., 2012). Esta relación permite comprender la importancia de una gestión del riego que sea capaz de vincular la demanda del cultivo con la operación efectiva del sistema.

En este contexto, el riego no debe entenderse únicamente como una práctica de aplicación de agua, sino como un proceso técnico que integra demanda hídrica, programación, infraestructura, operación y control. La disponibilidad de un sistema de riego no garantiza por sí sola una aplicación adecuada, ya que el desempeño final depende de la interacción entre el diseño hidráulico, la condición de sus componentes, la programación definida y la forma en que la operación se ejecuta en terreno.

## **6.2. Evapotranspiración y demanda hídrica**

La evapotranspiración es una variable fundamental para estimar los requerimientos hídricos del cultivo. Este concepto integra dos procesos: la evaporación del agua desde el suelo y otras superficies húmedas, y la transpiración del agua absorbida por las raíces y liberada a la atmósfera a través de los estomas de la planta (Allen et al., 1998). Ambos procesos ocurren de manera simultánea en el sistema suelo-planta-atmósfera, por lo que suelen analizarse de forma conjunta.

La evaporación depende principalmente de la energía disponible en la superficie, de la humedad del suelo superficial, del déficit de presión de vapor y de la velocidad del viento. La transpiración, por su parte, depende del desarrollo del cultivo, del área foliar, de la apertura estomática, de la disponibilidad de agua en la zona radicular y de las condiciones atmosféricas. La contribución relativa de ambos procesos varía durante el ciclo del cultivo: en etapas tempranas, cuando la cobertura vegetal es baja, la evaporación del suelo puede representar una fracción relevante; a medida que el cultivo se desarrolla, aumenta la participación de la transpiración (Allen et al., 1998).

La FAO distingue entre evapotranspiración de referencia, evapotranspiración del cultivo

bajo condiciones estándar y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (Allen et al., 1998). La evapotranspiración de referencia, denotada como  $ET_0$ , representa la demanda evaporativa de la atmósfera sobre una superficie de referencia. Esta variable permite aislar el efecto climático y utilizar una base común para estimar los requerimientos hídricos de distintos cultivos.

La evapotranspiración del cultivo, denotada como  $ET_c$ , incorpora las características propias del cultivo mediante el coeficiente de cultivo  $K_c$ . Bajo condiciones estándar, esta relación se expresa según la Ecuación 1.

$$ET_c = K_c \cdot ET_0, \quad (1)$$

donde  $ET_c$  corresponde a la evapotranspiración del cultivo en mm/día,  $ET_0$  a la evapotranspiración de referencia en mm/día y  $K_c$  al coeficiente de cultivo, que es adimensional. Esta formulación permite separar el efecto climático, representado por  $ET_0$ , del efecto asociado al cultivo, representado por  $K_c$  (Allen et al., 1998).

El coeficiente de cultivo varía durante la temporada debido a cambios en la cobertura vegetal, altura de la planta, arquitectura del dosel, resistencia aerodinámica, albedo y proporción relativa entre evaporación y transpiración. En etapas iniciales, el valor de  $K_c$  suele estar influido por la evaporación desde el suelo; en etapas de desarrollo y mediados de temporada, aumenta en la medida que la cobertura vegetal se incrementa; y en etapas finales puede disminuir producto de la senescencia, cosecha o reducción de actividad vegetativa (Allen et al., 1998).

La Figura 1 presenta una representación típica de la variación del coeficiente de cultivo durante el ciclo fenológico.

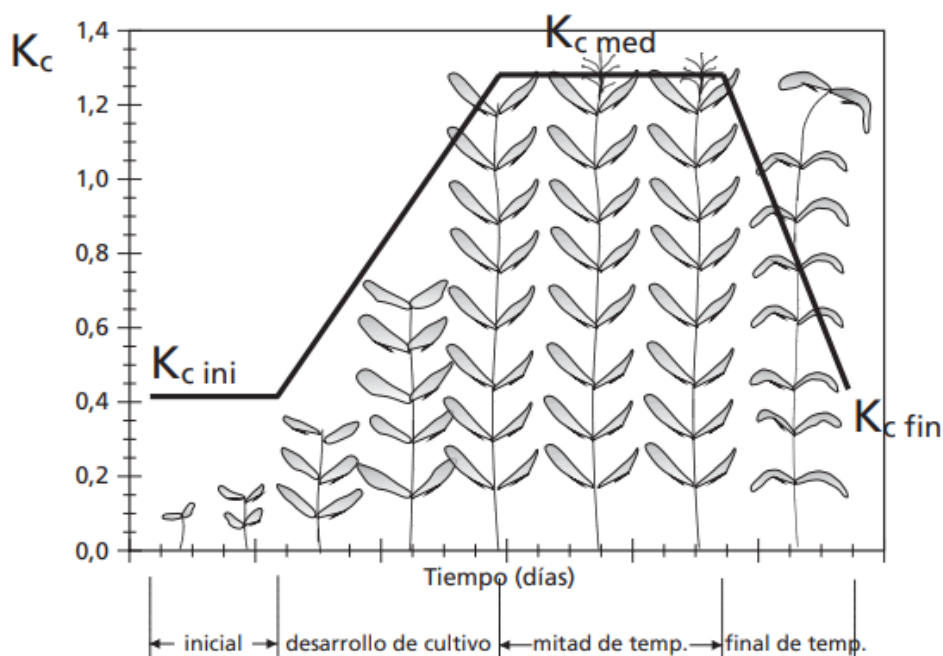


Figura 1: Variación típica del coeficiente de cultivo ( $K_c$ , adimensional) a lo largo del ciclo fenológico del cultivo, expresado en días. Adaptado de Allen et al. (1998).

La estimación de la evapotranspiración permite definir una referencia técnica para determinar la cantidad de agua que debe reponerse en un período determinado. Sin embargo, la estimación de la demanda hídrica no asegura por sí sola que el agua sea aplicada de manera efectiva, ya que dicha aplicación depende de la programación, de la infraestructura disponible y del desempeño operacional del sistema de riego.

### 6.3. Programación del riego

La programación del riego consiste en definir cuándo, cuánto y con qué frecuencia aplicar agua al cultivo. Su objetivo es mantener la disponibilidad de agua en el suelo dentro de rangos compatibles con el desarrollo del cultivo, evitando tanto déficits hídricos como aplicaciones excesivas que puedan generar percolación profunda, pérdida de nutrientes, saturación del suelo o uso

ineficiente del recurso.

En términos generales, la programación se construye a partir del balance entre la demanda hídrica del cultivo, las propiedades del suelo, la eficiencia del sistema, la estrategia de manejo y las restricciones operacionales. La demanda hídrica se estima principalmente mediante la evapotranspiración del cultivo, mientras que el suelo determina la capacidad de almacenar agua disponible para las raíces. A partir de estos elementos se definen frecuencias, láminas o tiempos de riego compatibles con el manejo agronómico y la capacidad del sistema (Allen et al., 1998).

En sistemas de riego tecnificado, la programación puede expresarse mediante lámina a aplicar, tiempo de riego, frecuencia semanal o diaria y sectorización operacional. La lámina corresponde a la profundidad equivalente de agua que se aplica sobre una superficie determinada, usualmente expresada en mm. El tiempo de riego corresponde a la duración de operación requerida para aplicar dicha lámina, y depende de la precipitación operacional o intensidad de aplicación del sistema, generalmente expresada en mm/h.

La programación también puede incorporar estrategias de riego deficitario cuando la disponibilidad hídrica es limitada o cuando se busca mejorar la productividad del agua. El riego deficitario corresponde a la aplicación de agua por debajo de los requerimientos completos de evapotranspiración, aceptando cierto nivel de déficit controlado con el propósito de reducir el consumo de agua o mejorar indicadores productivos y económicos (Feres y Soriano, 2007). La aplicación de este enfoque requiere considerar la sensibilidad del cultivo y la etapa fenológica en que se produce el déficit, ya que el impacto sobre el rendimiento no es uniforme durante la temporada (Doorenbos y Kassam, 1979; Steduto et al., 2012).

En cultivos frutales, la respuesta al riego depende tanto de la cantidad de agua aplicada como del momento en que ocurre el déficit. Estudios sobre riego deficitario regulado muestran que

es posible reducir aportes de agua en determinadas etapas, siempre que se mantenga control sobre el estado hídrico de la planta y sobre los efectos productivos esperados (Feres y Soriano, 2007; Naor et al., 2001). En consecuencia, la programación del riego debe entenderse como una decisión técnica que vincula demanda hídrica, disponibilidad de agua, sensibilidad del cultivo y capacidad de operación del sistema.

Para efectos del análisis operacional, la programación de riego constituye una referencia contra la cual puede compararse la ejecución real. Esta comparación permite evaluar si el sistema logra cumplir la programación de riego bajo condiciones reales de operación. No obstante, la programación no reemplaza el diagnóstico hidráulico del sistema, ya que el cumplimiento de los tiempos programados no garantiza por sí solo que el caudal, la presión o la intensidad de aplicación se mantengan dentro de los rangos esperados.

#### **6.4. Sistemas de riego presurizado**

Los sistemas de riego presurizado corresponden a infraestructuras que conducen y distribuyen el agua mediante redes cerradas de tuberías, utilizando energía de presión para transportar el flujo hasta los puntos de aplicación. Dentro de esta categoría se encuentran sistemas de aspersión, microaspersión y goteo. Estos sistemas permiten un mayor control sobre la oportunidad y localización de la aplicación de agua, aunque su desempeño depende de la interacción entre el diseño hidráulico, la operación y la condición de sus componentes (Keller y Bliesner, 1990).

En un sistema presurizado, la presión disponible condiciona el caudal descargado por los emisores y, por tanto, la distribución del agua dentro de la unidad de riego. Las pérdidas de carga por fricción, los desniveles topográficos, la longitud de las tuberías, la simultaneidad de operación,

el estado de filtros y válvulas, y las características de los emisores influyen en el comportamiento hidráulico del sistema. Por ello, el desempeño de un sistema de riego presurizado no depende únicamente de su diseño inicial, sino también de su operación y mantenimiento a lo largo del tiempo (Keller y Bliesner, 1990; Alabas, 2013).

El riego por goteo, también denominado riego localizado o riego por microirrigación, aplica agua en bajos caudales cerca de la zona radicular del cultivo. Su uso permite una aplicación frecuente y localizada, con potencial para mejorar la eficiencia del uso del agua en comparación con métodos menos controlados. Sin embargo, al operar con emisores de bajo caudal y pasos de agua reducidos, es sensible a obstrucciones, variaciones de presión, fallas de filtrado y diferencias en la descarga de emisores (Keller y Bliesner, 1990).

Una característica relevante de los sistemas de goteo es que la aplicación final de agua resulta de una cadena de componentes conectados funcionalmente. La fuente de agua, la impulsión, el filtrado, la conducción, la regulación, el control sectorial y los emisores deben operar de manera coordinada para que el sistema cumpla su función. Una alteración en cualquiera de estos niveles puede modificar las condiciones de aplicación en terreno.

De manera general, un sistema de riego por goteo puede representarse como una estructura funcional compuesta por fuente de agua, unidad de impulsión y filtrado, red de distribución, control sectorial, sectores, bloques y emisores. Esta secuencia permite comprender el recorrido del agua desde su origen hasta su aplicación final, tal como se presenta en la Figura 2.

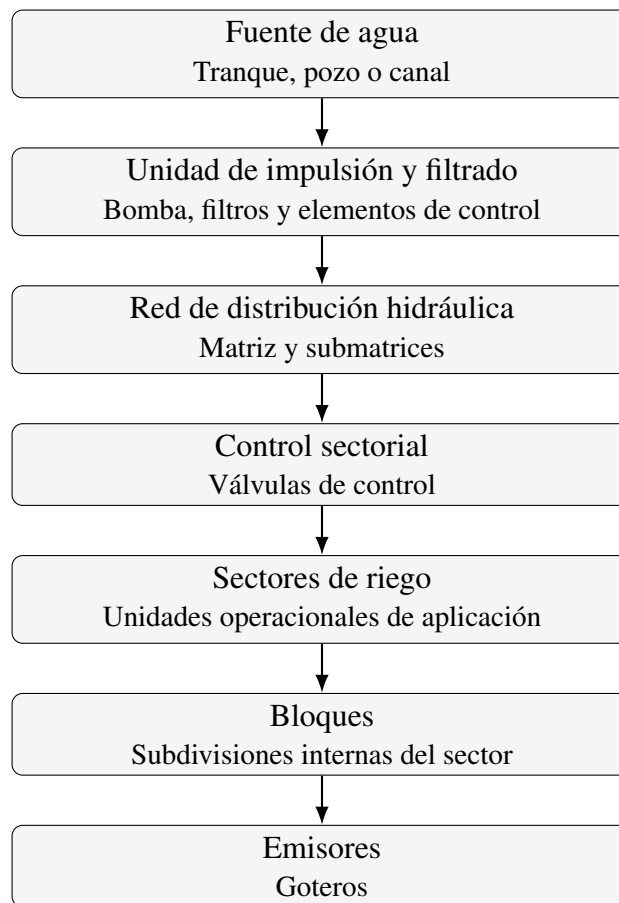


Figura 2: Estructura funcional general de un sistema de riego por goteo, desde la fuente de agua hasta la aplicación mediante emisores. Elaboración propia.

Cada componente cumple una función dentro del proceso de aplicación. La fuente debe asegurar disponibilidad de agua; la impulsión debe entregar la energía necesaria para mover el flujo; el filtrado debe retener partículas que puedan afectar la red o los emisores; la red de distribución debe conducir el agua hacia las unidades de riego; las válvulas deben controlar la apertura y cierre de sectores; y los emisores deben descargar el caudal de diseño bajo condiciones hidráulicas adecuadas. Desde esta perspectiva, el sistema de riego puede analizarse como un conjunto de funciones encadenadas, donde el desempeño final depende de la continuidad y coordinación entre subsistemas.

## 6.5. Variables hidráulicas y operacionales del riego

El análisis del desempeño de un sistema de riego requiere definir variables que permitan describir su operación. Estas variables representan características hidráulicas y operacionales del sistema, y permiten comparar la condición observada con una condición esperada, programada o de referencia. Entre las principales variables se encuentran el caudal, la presión, el tiempo de riego, el volumen aplicado, la lámina, la precipitación operacional y la uniformidad de aplicación.

El caudal corresponde al volumen de agua que circula por una sección del sistema por unidad de tiempo. En sistemas de riego suele expresarse en  $\text{m}^3/\text{h}$ , aunque también puede utilizarse  $\text{L/s}$  dependiendo de la escala de análisis. El caudal puede evaluarse a nivel de fuente, equipo, sector, bloque, lateral o emisor. Su valor depende de la presión disponible, de la configuración hidráulica, del número de emisores en operación y del estado de los componentes de conducción y control (Keller y Bliesner, 1990).

La presión corresponde a la energía disponible por unidad de peso del agua, y se expresa comúnmente en metros de columna de agua, bar o kilopascales. En sistemas presurizados, la presión es determinante para que los emisores trabajen dentro de su rango de operación. Presiones inferiores a las requeridas pueden reducir el caudal descargado y afectar la uniformidad de aplicación, mientras que presiones superiores pueden aumentar la descarga, generar sobreaplicación o incrementar esfuerzos sobre componentes del sistema (Keller y Bliesner, 1990; Alabas, 2013).

El tiempo de riego corresponde a la duración durante la cual un sector o unidad de riego permanece en operación. Se expresa normalmente en horas o minutos, según la escala de programación y control. En conjunto con el caudal, permite determinar el volumen aplicado, el cual representa la cantidad total de agua entregada durante un evento de riego y suele expresarse en  $\text{m}^3$ .

La lámina aplicada corresponde a la profundidad equivalente de agua distribuida sobre una superficie determinada, y se expresa en mm. Esta variable permite relacionar la operación hidráulica del sistema con los requerimientos hídricos del cultivo, ya que la demanda de riego se expresa frecuentemente en términos de lámina. La precipitación operacional, por su parte, corresponde a la intensidad con que el sistema aplica agua sobre la superficie, generalmente expresada en mm/h.

La precipitación operacional puede estimarse a partir del caudal y de la superficie regada, según la Ecuación 2.

$$Prec_{op} = \frac{Q}{10 \cdot A}, \quad (2)$$

donde  $Prec_{op}$  corresponde a la precipitación operacional en mm/h,  $Q$  al caudal en m<sup>3</sup>/h y  $A$  a la superficie en hectáreas. El factor 10 permite convertir la relación entre metros cúbicos por hora y hectáreas a milímetros por hora.

A partir de la precipitación operacional, la lámina aplicada puede calcularse multiplicando la intensidad de aplicación por el tiempo efectivo de riego, como se presenta en la Ecuación 3.

$$L = Prec_{op} \cdot t, \quad (3)$$

donde  $L$  corresponde a la lámina aplicada en mm y  $t$  al tiempo de riego en horas.

La uniformidad de aplicación es otro indicador relevante en sistemas de riego, ya que describe qué tan homogénea es la distribución del agua dentro de una unidad de riego. Una baja uniformidad implica que distintas zonas pueden recibir cantidades diferentes de agua, aun cuando el volumen total aplicado sea adecuado. En riego por goteo, la uniformidad puede verse afectada por variaciones de presión, diferencias entre emisores, obstrucciones, longitud de laterales, desniveles

y condiciones de filtrado (Keller y Bliesner, 1990; Alabas, 2013).

El uso conjunto de estas variables permite caracterizar la operación del sistema y establecer comparaciones con criterios de diseño, programación o mediciones de referencia. No obstante, la interpretación de dichas comparaciones depende del contexto técnico en que se utilicen. Una diferencia entre una variable observada y una referencia puede indicar una condición que requiere revisión, pero su causa debe evaluarse mediante análisis complementarios, mediciones adicionales o inspección técnica.

## **6.6. Desempeño operacional y diagnóstico de desviaciones**

El desempeño operacional de un sistema de riego se relaciona con su capacidad para cumplir la función para la cual fue diseñado bajo condiciones reales de operación. En sistemas agrícolas presurizados, esta función no se limita a transportar agua, sino que considera la entrega del recurso al cultivo en condiciones compatibles con la programación, el diseño hidráulico y los criterios de manejo definidos. Por ello, el desempeño puede evaluarse mediante variables como caudal, presión, tiempo de operación, volumen aplicado, lámina, precipitación operacional y uniformidad de aplicación.

Una desviación operacional corresponde a una diferencia entre una condición observada y una referencia definida. Dicha referencia puede provenir del diseño hidráulico, de la programación de riego, de mediciones de campo, de especificaciones técnicas del sistema o de parámetros registrados por la organización. En consecuencia, las desviaciones permiten identificar diferencias entre lo esperado y lo observado, pero no explican por sí solas la causa que las origina.

Esta distinción es relevante porque una misma desviación puede tener distintos orígenes.

En algunos casos, puede estar asociada a una condición hidráulica u operacional del sistema, como variaciones de presión, restricciones de flujo, obstrucciones, fugas o funcionamiento deficiente de componentes. En otros casos, puede relacionarse con información técnica incompleta, parámetros de referencia no actualizados, errores de registro o diferencias entre fuentes de datos. Por ello, el diagnóstico operacional debe interpretar las desviaciones como señales que orientan la revisión técnica, y no como evidencia concluyente de una falla física del activo.

El diagnóstico de desviaciones requiere comparar variables observadas con referencias técnicamente definidas y, cuando es posible, contrastarlas con antecedentes complementarios. En sistemas de riego presurizado, el análisis conjunto de caudal, presión, tiempo de operación, volumen aplicado y lámina permite caracterizar el comportamiento hidráulico y operacional del sistema. Sin embargo, la determinación de la causa específica de una desviación exige análisis adicionales, tales como mediciones hidráulicas, inspecciones en terreno, revisión de componentes o verificación de parámetros de configuración.

Desde la perspectiva de mantenimiento, el diagnóstico operacional cumple una función de apoyo a la toma de decisiones. Su propósito es aportar información para identificar activos, sectores o componentes que requieren revisión, priorizar recursos técnicos y orientar el análisis funcional posterior. De esta forma, los registros operacionales pueden utilizarse como una entrada para metodologías de mantenimiento, siempre que se reconozcan sus alcances y limitaciones como fuente de evidencia.

## **6.7. Gestión de activos físicos e información documentada**

La gestión de activos corresponde a un enfoque orientado a generar valor a partir de los activos de una organización, equilibrando desempeño, costo y riesgo a lo largo de su ciclo de vida (International Organization for Standardization, 2014a). Bajo esta perspectiva, los activos físicos no se administran únicamente como elementos técnicos aislados, sino como recursos que contribuyen al cumplimiento de los objetivos organizacionales.

La norma ISO 55001 establece requisitos para sistemas de gestión de activos, incluyendo planificación, apoyo, operación, evaluación del desempeño, mejora continua e información documentada (International Organization for Standardization, 2014b). Aunque su aplicación completa requiere un sistema formal de gestión, sus principios son relevantes para organizaciones que dependen de infraestructura física para sostener un nivel de servicio. Entre estos principios se encuentran la trazabilidad de la información, la definición de responsabilidades, la evaluación del desempeño y la toma de decisiones basada en evidencia.

En sistemas de riego agrícola presurizado, los activos físicos incluyen componentes como bombas, filtros, tuberías, válvulas, reguladores, contadores, sensores, tableros eléctricos, elementos de control y emisores. Estos activos permiten captar, conducir, filtrar, regular, controlar y aplicar agua al cultivo. La pérdida de desempeño de alguno de estos componentes puede afectar la capacidad del sistema para cumplir su función operacional.

La gestión de activos requiere contar con información suficiente para conocer el estado, la configuración y el comportamiento de los activos. En sistemas de riego, esta información puede incluir planos, jerarquía de activos, superficies, caudales de diseño, presiones de operación, características de emisores, programación, registros de operación, mediciones de terreno, eventos,

intervenciones y antecedentes de mantenimiento. La calidad de esta información condiciona la capacidad de diagnosticar problemas, priorizar acciones y evaluar resultados.

La información documentada permite mantener trazabilidad entre una condición observada, el activo involucrado, la acción realizada y el resultado obtenido. Cuando los antecedentes de mantenimiento no se registran de manera estructurada, se dificulta la identificación de recurrencias, el análisis de componentes críticos, la estimación de indicadores de confiabilidad y la evaluación de la efectividad de las tareas. En cambio, un registro ordenado de intervenciones permite acumular conocimiento operacional y mejorar progresivamente la toma de decisiones.

En consecuencia, la gestión de activos físicos se relaciona estrechamente con la gestión de la información. Un diagnóstico técnicamente válido no depende solo de medir variables operacionales, sino también de contar con referencias confiables, registros trazables y antecedentes suficientes para interpretar dichas mediciones. Esta relación es especialmente importante en sistemas distribuidos, como los sistemas de riego, donde múltiples componentes y fuentes de información interactúan para determinar el desempeño final.

Bajo esta lógica, la revisión y actualización de referencias operacionales, superficies, parámetros de diseño y registros de intervención puede entenderse como parte del mantenimiento de la información que sostiene la gestión del activo físico.

## **6.8. Mantenimiento en sistemas de riego**

El mantenimiento corresponde al conjunto de actividades destinadas a conservar o restaurar la capacidad de un activo para cumplir una función requerida. En sistemas de riego agrícola, dicha función se relaciona con la entrega de agua al cultivo bajo condiciones definidas de cantidad, opor-

tunidad y desempeño hidráulico. Por ello, el mantenimiento no se limita a reparar componentes, sino que contribuye a sostener el nivel de servicio del sistema.

La literatura sobre mantenimiento en riego señala que la infraestructura hidráulica puede deteriorarse con el tiempo y que la falta de mantenimiento oportuno puede afectar el desempeño de los sistemas, generando pérdidas de capacidad, menor confiabilidad, distribución ineficiente del agua y mayores necesidades de rehabilitación (Huppert et al., 2003). Desde esta perspectiva, el mantenimiento debe entenderse como parte de la provisión del servicio de riego y no únicamente como una intervención técnica aislada sobre componentes físicos (Svendsen y Huppert, 2003).

Existen distintas estrategias de mantenimiento según el momento de intervención, el tipo de información disponible y la forma en que se manifiesta la pérdida de función. El mantenimiento correctivo se realiza después de ocurrida una falla, con el objetivo de restaurar la función perdida. Cuando la gestión se basa principalmente en responder a problemas ya manifestados, puede hablarse de una lógica reactiva de mantenimiento. Si bien este enfoque es necesario ante fallas imprevistas, puede resultar insuficiente cuando se requiere reducir recurrencias, planificar recursos o sostener un nivel de servicio determinado.

El mantenimiento preventivo se realiza antes de la ocurrencia de la falla, generalmente en intervalos definidos por tiempo, uso o calendario. Su propósito es reducir la probabilidad de pérdida de función mediante tareas programadas, tales como inspecciones, limpiezas, ajustes, recambios o lubricación. Su efectividad depende de que los intervalos definidos sean adecuados para el contexto operacional, el comportamiento de los componentes y las consecuencias asociadas a su falla.

El mantenimiento basado en condición utiliza información del estado real del activo para decidir cuándo intervenir. Bajo este enfoque, la intervención se activa cuando una variable o indicador supera un umbral previamente definido. El mantenimiento predictivo, por su parte, también

utiliza información de condición, pero busca proyectar la evolución de una variable para anticipar el momento probable en que la falla ocurrirá o alcanzará un nivel inaceptable. Ambos enfoques comparten el uso de datos de condición, pero se diferencian en que el primero actúa frente a una condición observada respecto de un umbral, mientras que el segundo intenta estimar su evolución futura.

En sistemas de riego, la selección de una estrategia de mantenimiento debe considerar el tipo de componente, la forma en que puede fallar, la posibilidad de detectar la falla antes de que produzca efectos relevantes, las consecuencias de la pérdida de función y la disponibilidad de información. Componentes como bombas, filtros, válvulas, reguladores, sensores, tuberías y emisores pueden requerir estrategias distintas, dependiendo de su criticidad, modo de falla, frecuencia de uso y condiciones de operación.

El análisis de mantenimiento puede apoyarse en indicadores de confiabilidad cuando existe información histórica suficiente, tales como tiempos entre fallas, frecuencia de intervenciones o recurrencia de modos de falla. Sin embargo, el uso robusto de este tipo de indicadores requiere registros consistentes de operación, fallas e intervenciones a lo largo del tiempo. Cuando la información histórica es limitada o no se encuentra estructurada, estos indicadores no permiten definir con precisión tasas de falla ni intervalos de mantenimiento técnicamente validados. En tales casos, resulta necesario complementar la información disponible con criterios técnicos, antecedentes operacionales, inspecciones y metodologías estructuradas de análisis funcional.

En sistemas de riego, la definición de un mantenimiento adecuado depende del nivel de servicio que se busca sostener, de las consecuencias asociadas a la pérdida de función y de los recursos disponibles. Por ello, la planificación del mantenimiento debe vincularse con el desempeño esperado del sistema y con la información disponible para tomar decisiones. Este enfoque

permite avanzar desde una respuesta exclusivamente reactiva hacia una gestión de mantenimiento más estructurada, trazable y orientada al cumplimiento de funciones.

## **6.9. Criticidad y priorización para mantenimiento**

La gestión del mantenimiento requiere decidir dónde concentrar recursos técnicos, humanos y económicos. En sistemas con múltiples activos, no todos los componentes tienen la misma relevancia para el cumplimiento de la función del sistema ni generan las mismas consecuencias en caso de falla. Por ello, la priorización permite ordenar activos, subsistemas o componentes según criterios que apoyen la toma de decisiones de mantenimiento.

La criticidad corresponde, en términos generales, a una medida de la importancia relativa de un activo o componente considerando la combinación entre la probabilidad o frecuencia de ocurrencia de una falla y sus consecuencias. Estas consecuencias pueden ser operacionales, económicas, ambientales, de seguridad o de calidad del servicio. En mantenimiento, el análisis de criticidad se utiliza para identificar aquellos activos cuya pérdida de función puede generar mayores impactos y que, por tanto, requieren mayor atención dentro de la estrategia de gestión.

Existen distintos enfoques para evaluar criticidad. Algunos se basan en matrices cualitativas de riesgo, combinando frecuencia y consecuencia mediante escalas ordinales. Otros incorporan información cuantitativa, como tasas de falla, costos de intervención, tiempos de detención, impacto en la producción o pérdida de capacidad de servicio. La elección del enfoque depende de la disponibilidad de información, del nivel de madurez de la organización y del objetivo del análisis.

En contextos donde existe información histórica limitada, la priorización puede apoyarse en evidencia operacional, registros de eventos, inspecciones, antecedentes técnicos y juicio experto.

En estos casos, la priorización no debe interpretarse como una estimación probabilística exacta de falla, sino como un procedimiento estructurado para focalizar el análisis en los activos que presentan mayor evidencia de relevancia operacional o de mantenimiento. Esta distinción es importante, ya que permite utilizar información disponible sin atribuirle un nivel de precisión que no posee.

La priorización cumple un rol complementario al análisis funcional. Mientras la criticidad ayuda a seleccionar dónde concentrar esfuerzos, metodologías como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad permiten analizar con mayor profundidad qué funciones deben preservarse, cómo pueden fallar, qué consecuencias tendría esa falla y qué tareas resultan técnicamente apropiadas. Por ello, en sistemas complejos o distribuidos, la priorización puede actuar como etapa previa para focalizar la aplicación detallada de metodologías de mantenimiento.

En sistemas de riego agrícola presurizado, la priorización puede considerar criterios como el nivel de servicio esperado, la superficie atendida, la frecuencia de uso, la recurrencia de intervenciones, la presencia de desviaciones operacionales, la disponibilidad de repuestos, la dificultad de acceso y las consecuencias de una pérdida de función sobre la aplicación de agua. Estos criterios deben definirse de manera coherente con el contexto operacional y con la información disponible.

## **6.10. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad**

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, o Reliability Centered Maintenance (RCM), es una metodología orientada a determinar qué tareas de mantenimiento deben realizarse para asegurar que un activo continúe cumpliendo las funciones requeridas en su contexto operacional (Moubray, 1997). Su enfoque se basa en analizar las funciones del activo, las formas en que estas pueden perderse, las consecuencias de dichas pérdidas y las acciones más adecuadas para

gestionarlas.

Una característica central del RCM es que el mantenimiento se define a partir de la función que el activo debe cumplir, y no únicamente a partir del componente físico. Esto implica que un activo puede estar físicamente operativo, pero fallar funcionalmente si no cumple el estándar requerido de desempeño. En este sentido, el RCM desplaza el foco desde la reparación de componentes hacia la preservación de funciones dentro de un contexto operacional definido.

El primer concepto relevante es la función. Una función corresponde a lo que el usuario requiere que el activo haga bajo condiciones específicas de operación. En sistemas técnicos, una función debe expresarse con un verbo, un objeto y, cuando corresponda, un estándar de desempeño. Por ejemplo, no basta con señalar que una bomba “funciona”, sino que debe indicarse qué caudal, presión o disponibilidad debe entregar para satisfacer el requerimiento del sistema.

El segundo concepto es la falla funcional. Una falla funcional corresponde a la incapacidad total o parcial de un activo para cumplir una función de acuerdo con el estándar definido (Moubray, 1997). Esta definición es relevante porque permite distinguir entre la existencia física del activo y su desempeño esperado. Un componente puede seguir operando, pero no cumplir el estándar requerido de caudal, presión, control, apertura, cierre, medición o disponibilidad.

El tercer concepto es el modo de falla. Un modo de falla corresponde a la manera específica en que un activo deja de cumplir una función, es decir, a cómo se manifiesta la pérdida de desempeño respecto del estándar definido. Debe distinguirse de la causa que lo produce: el modo describe la forma en que se pierde la función, mientras que la causa probable corresponde al mecanismo físico, operacional o de información que podría originar esa manifestación. Por ejemplo, una válvula que no corta el paso de agua al cerrar corresponde a una manifestación de pérdida de función; las causas probables podrían ser desgaste del asiento, falla del solenoide, suciedad interna,

pérdida de señal o configuración incorrecta.

Esta distinción es relevante porque un mismo modo de falla puede tener distintas causas probables, y porque las tareas de mantenimiento deben formularse con suficiente detalle para orientar la verificación y actuar sobre dichas causas cuando sean confirmadas. En sistemas de riego, los modos de falla pueden manifestarse como caudal insuficiente, caudal excesivo, presión fuera de rango, válvula que no abre, válvula que no cierra, sector que no riega, paso de agua no asignado o entrega de agua inferior a la requerida. Estas manifestaciones pueden originarse en causas como obstrucción de filtros, desgaste de bombas, roturas, emisores obstruidos, fallas eléctricas, sensores defectuosos, problemas de control o configuraciones incorrectas.

El cuarto concepto corresponde a los efectos y consecuencias de la falla. El efecto describe qué ocurre cuando se presenta un modo de falla, mientras que la consecuencia evalúa la importancia de ese efecto para la operación, la seguridad, el ambiente, la calidad del servicio o los costos. En RCM, la selección de tareas no depende únicamente de la existencia de un modo de falla, sino de las consecuencias que este genera dentro del contexto operacional (Moubray, 1997).

El RCM distingue entre distintos tipos de consecuencias, tales como consecuencias ocultas, de seguridad, ambientales, operacionales y no operacionales. Las consecuencias ocultas se relacionan con fallas que no son evidentes para los operadores en condiciones normales, pero que pueden aumentar el riesgo si coinciden con otra falla. Las consecuencias operacionales afectan la producción, disponibilidad, calidad del servicio o costos de operación. Las no operacionales no afectan directamente la operación, pero pueden generar costos de reparación o reposición.

Una vez identificadas funciones, fallas funcionales, modos de falla, efectos y consecuencias, la metodología RCM orienta la selección de tareas de mantenimiento. Estas pueden incluir tareas a condición, tareas de reacondicionamiento o sustitución programada, tareas de búsqueda

de falla, rediseño, cambios en procedimientos o decisiones de operar hasta la falla cuando las consecuencias lo permiten. La lógica del RCM busca seleccionar tareas técnicamente factibles y justificadas por sus consecuencias, evitando aplicar mantenimiento preventivo sin relación clara con el modo de falla que se pretende gestionar.

## **6.11. Las siete preguntas del RCM**

La metodología RCM se estructura a partir de siete preguntas fundamentales que permiten desarrollar el análisis funcional del activo (Moubray, 1997). Estas preguntas establecen una secuencia lógica para pasar desde la definición de funciones hasta la selección de tareas de mantenimiento.

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño del activo en su contexto operacional?
2. ¿De qué manera puede fallar en el cumplimiento de sus funciones?
3. ¿Qué causa cada falla funcional?
4. ¿Qué ocurre cuando se presenta cada modo de falla?
5. ¿Qué consecuencias tiene cada falla?
6. ¿Qué puede hacerse para prevenir o anticipar la falla?
7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea preventiva adecuada?

La primera pregunta define las funciones del activo y sus estándares de desempeño. Este paso es esencial porque el análisis de mantenimiento se construye sobre lo que el activo debe hacer

y no solamente sobre su configuración física. Una función sin estándar dificulta determinar cuándo existe una falla funcional.

La segunda pregunta identifica las fallas funcionales, es decir, las formas en que el activo puede dejar de cumplir sus funciones. Estas fallas pueden ser totales o parciales. Por ejemplo, un sistema puede dejar completamente de entregar agua, o bien entregar agua con un caudal, presión o control inferior al estándar requerido.

La tercera pregunta permite identificar los modos de falla y formular sus causas probables. En la formulación clásica del RCM, esta pregunta se expresa como “qué causa cada falla funcional”; sin embargo, su desarrollo práctico requiere distinguir entre la manifestación de la pérdida de función y el mecanismo que la origina. El modo de falla describe cómo se pierde la función, mientras que la causa probable corresponde al origen físico, operacional o de información que explica esa manifestación. Esta distinción permite evitar descripciones demasiado generales, como “falla hidráulica”, que no orientan adecuadamente la selección de tareas.

La cuarta pregunta describe los efectos de la falla. Esta etapa busca establecer qué ocurre cuando se presenta cada modo de falla, cómo se detecta, qué variables se ven afectadas, qué acciones puede requerir y qué impacto inmediato tiene sobre la operación del sistema.

La quinta pregunta evalúa las consecuencias de la falla. En esta etapa se determina por qué la falla importa, considerando si sus efectos afectan la seguridad, el ambiente, la operación, la calidad del servicio, los costos o la disponibilidad. Esta clasificación es relevante porque el tipo de consecuencia condiciona la lógica de decisión de mantenimiento.

La sexta pregunta busca identificar tareas proactivas que permitan predecir o prevenir la falla. Estas tareas pueden ser a condición, de reacondicionamiento programado o de sustitución programada, siempre que sean técnicamente factibles y valga la pena realizarlas en función de las

consecuencias de la falla.

La séptima pregunta define qué hacer cuando no existe una tarea proactiva adecuada. En tales casos, las alternativas pueden incluir búsqueda de falla, rediseño, cambios en procedimientos, capacitación, mejora de información o decisión de operar hasta la falla, dependiendo del tipo de consecuencia y del contexto operacional.

## **6.12. Aplicación del RCM en sistemas de riego**

La aplicación de la metodología RCM en sistemas de riego permite analizar la infraestructura desde una perspectiva funcional. En lugar de considerar únicamente la existencia de componentes físicos, el análisis se concentra en las funciones que el sistema debe cumplir: captar, conducir, filtrar, regular, controlar y aplicar agua bajo condiciones requeridas. Esta mirada resulta pertinente en sistemas presurizados, donde la pérdida de desempeño puede manifestarse no solo como detención total, sino también como variaciones de caudal, presión, uniformidad, control o disponibilidad.

Estudios sobre aplicación de RCM en sistemas de riego han señalado que esta metodología puede apoyar la planificación de actividades de mantenimiento y la toma de decisiones estructurada, considerando funciones del sistema, modos de falla y consecuencias para el cultivo y la operación (Alves et al., 2015). Su utilidad radica en vincular la gestión de mantenimiento con el desempeño requerido del sistema y con los efectos que una pérdida de función puede generar.

En sistemas de riego, las funciones pueden definirse a distintos niveles. A nivel de impulsión, una función puede ser entregar un caudal y presión determinados. A nivel de filtrado, puede ser retener partículas para proteger la red y los emisores. A nivel de control, puede ser abrir y

cerrar sectores según una orden definida. A nivel de distribución, puede ser conducir el agua hacia las unidades de riego con pérdidas compatibles con el diseño. A nivel de aplicación, puede ser entregar agua al cultivo con una intensidad y uniformidad dentro de los rangos esperados.

Las fallas funcionales deben expresarse como pérdidas observables respecto de esos estándares. Por ejemplo, una bomba puede no entregar la presión requerida, un filtro puede no retener partículas dentro del nivel esperado, una válvula puede no abrir o no cerrar cuando corresponde, o una red puede no conducir el caudal requerido hacia un sector. Los modos de falla deben expresarse como la manera en que se manifiesta esa pérdida de función, mientras que sus causas probables deben vincularse con componentes físicos, condiciones hidráulicas, errores de operación, problemas de configuración o inconsistencias de información.

La aplicación del RCM en riego también exige considerar que las consecuencias de una falla pueden no observarse únicamente en el componente afectado. Una falla de filtrado puede manifestarse posteriormente como obstrucción de emisores; una falla de regulación puede alterar el caudal aplicado; una falla de control puede provocar ausencia de riego o paso de agua no asignado; y una falla de medición o información puede afectar la interpretación del desempeño del sistema. Por ello, el análisis funcional debe considerar la relación entre componentes, operación y aplicación final de agua.

En este tipo de sistemas, el RCM puede complementarse con información operacional, mediciones hidráulicas, registros de eventos, inspecciones y antecedentes de mantenimiento. Estos elementos permiten orientar el análisis hacia los activos o funciones que requieren mayor atención. Sin embargo, la metodología requiere que las hipótesis de falla sean verificables y que las tareas propuestas se relacionen explícitamente con los modos de falla y causas probables formuladas.

En síntesis, el RCM entrega una estructura para convertir el conocimiento técnico del siste-

ma en decisiones de mantenimiento justificadas. Su aplicación en sistemas de riego agrícola resulta pertinente cuando se busca pasar desde intervenciones reactivas hacia una gestión más trazable, funcional y orientada al desempeño del sistema.

## 7. Metodología

### 7.1. Enfoque metodológico

El desarrollo de esta investigación se organiza en dos etapas consecutivas y complementarias. La primera, denominada Fase 0, corresponde a un diagnóstico operacional orientado a priorizar, sobre la base de la evidencia disponible, los equipos de riego que concentran desviaciones, recurrencias o antecedentes relevantes para el mantenimiento. La segunda corresponde a la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) sobre los equipos seleccionados, con el fin de analizar sus funciones, fallas funcionales, modos de falla, causas probables, efectos, consecuencias y tareas de mantenimiento. El análisis se desarrolla sobre los datos operacionales del campo El Huaico correspondientes a la temporada de riego comprendida entre octubre de 2025 y abril de 2026.

Anteponer una etapa de diagnóstico al análisis RCM responde a una característica propia de los sistemas de riego agrícola: están compuestos por múltiples equipos, sectores y componentes que operan de manera distribuida y que pueden compartir infraestructura hidráulica, eléctrica o de control. En este contexto, aplicar un análisis RCM detallado a todos los equipos resultaría impracticable y poco eficiente, ya que no todos presentan el mismo nivel de evidencia operacional o de mantenimiento que justifique un análisis en profundidad. El RCM, en su formulación clásica, permite analizar activos una vez definido el objeto de estudio, pero no establece por sí mismo un criterio cuantitativo para seleccionar qué equipos deben analizarse primero (Moubray, 1997). La Fase 0 cubre ese vacío mediante un criterio de focalización construido a partir de datos operacionales y antecedentes de terreno.

Para construir dicho criterio, los sectores de riego se utilizan como unidades de observación

del desempeño, mientras que la priorización final se realiza a nivel de equipo, entendido como el activo mantenible sobre el cual se aplicará posteriormente el análisis RCM. Esta distinción permite analizar el comportamiento registrado en cada sector sin perder la trazabilidad hacia el equipo al que pertenece. De esta manera, la Fase 0 opera como una etapa intermedia entre los registros diarios de operación y la selección de activos para el análisis funcional.

Un principio central de esta etapa es separar explícitamente los distintos roles que cumple la información. Las fuentes de datos corresponden a los sistemas desde los cuales se obtiene la información; los indicadores corresponden a variables calculadas a partir de esos datos, como desviaciones de caudal, precipitación o cumplimiento de programa; los antecedentes corresponden a evidencia complementaria levantada en terreno; las hipótesis corresponden a interpretaciones probables sobre una desviación observada; y las decisiones corresponden a la priorización de equipos y a la posterior definición de tareas de mantenimiento. Mantener separados estos roles permite que una desviación operacional no se interprete de manera inmediata como una falla física confirmada, sino como una señal de desempeño que orienta el análisis posterior.

Una vez seleccionados los equipos prioritarios, la segunda etapa aplica la metodología RCM estructurada a partir de las siete preguntas fundamentales propuestas por Moubray (1997). En esta etapa, la evidencia obtenida en la Fase 0 se utiliza para orientar el análisis funcional de cada equipo, relacionando las desviaciones operacionales, los antecedentes de terreno y los registros de intervención con posibles fallas funcionales, modos de falla, causas probables y consecuencias para la operación del riego.

## **Justificación del enfoque**

La principal ventaja del enfoque propuesto es que separa la identificación y priorización de problemas, basada en evidencia operacional, de la definición de acciones de mantenimiento, estructurada mediante la metodología RCM. Esta separación resulta pertinente en sistemas de riego agrícola, donde el mantenimiento no solo debe responder a la condición física de los componentes, sino también al nivel de servicio que el sistema debe sostener. En este tipo de sistemas, la pérdida de desempeño puede manifestarse como una detención completa, pero también como desviaciones parciales de caudal, presión, precipitación, control o cumplimiento de programa.

La literatura sobre gestión del mantenimiento en riego plantea que la mantención debe entenderse en relación con la capacidad del sistema para sostener un nivel de desempeño definido, considerando restricciones técnicas, económicas e institucionales, y que su provisión depende de múltiples actores y contextos, por lo que no puede abordarse únicamente como una intervención técnica aislada (Svendsen y Huppert, 2003; Huppert et al., 2003). El RCM, a su vez, ha sido aplicado en sistemas de riego para analizar funciones, subsistemas, modos de falla y consecuencias, orientando la selección de tareas hacia la continuidad operacional y la confiabilidad (Alves et al., 2015).

Por ello, en esta investigación la Fase 0 se utiliza como una etapa de diagnóstico y priorización previa, mientras que la metodología RCM se utiliza como marco para transformar la evidencia seleccionada en decisiones de mantenimiento justificadas y trazables. Esta combinación permite pasar desde registros operacionales dispersos hacia un análisis funcional estructurado, evitando que las tareas de mantenimiento se definan únicamente por reacción ante fallas visibles o por criterios no documentados.

## **7.2. Fase 0: diagnóstico y priorización**

### **7.2.1. Delimitación del sistema y contexto operacional**

La delimitación del sistema de estudio se centra en el campo agrícola El Huaico, operado por la empresa Garcés Fruit, seleccionado por la disponibilidad de registros operacionales, antecedentes de terreno y trazabilidad del sistema a nivel de equipos y sectores. La aplicación del RCM requiere definir previamente el contexto operacional del activo, ya que las decisiones de mantenimiento dependen de las condiciones bajo las cuales el sistema cumple sus funciones (Moubray, 1997; Alves et al., 2015).

El sistema corresponde a una red de riego agrícola presurizado cuya función principal es aplicar agua al cultivo en la cantidad, oportunidad y condiciones hidráulicas requeridas. La infraestructura del campo está compuesta por diez equipos de riego, distribuidos espacialmente para cubrir la superficie cultivada. Estos equipos no operan como unidades completamente aisladas, sino integrados a una red común de abastecimiento, impulsión y distribución.

Esta configuración es relevante para el diagnóstico, ya que una desviación observada en la operación de un sector puede originarse tanto en elementos propios de ese sector como en componentes compartidos del sistema, tales como impulsión, filtrado, conducción, regulación de presión o control hidráulico. En sistemas de riego presurizado, el desempeño depende precisamente de la interacción entre estos elementos y la aplicación final de agua en terreno (Keller y Bliesner, 1990).

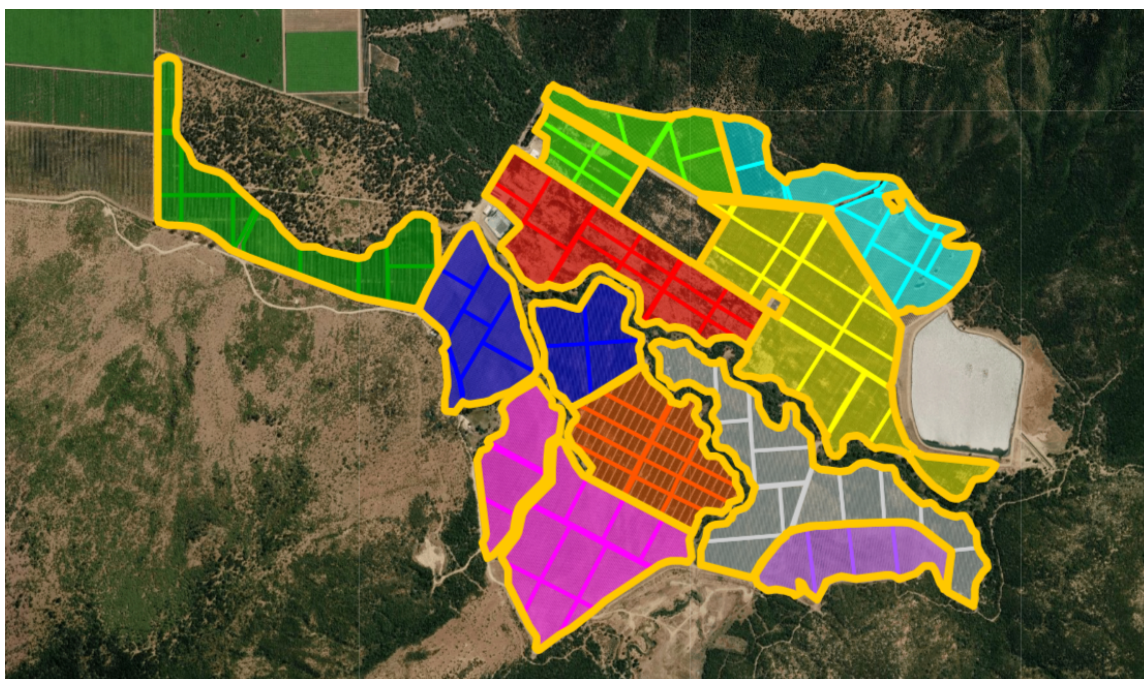


Figura 3: Distribución general de los equipos de riego del campo El Huaico.

La Figura 3 presenta la distribución general de los equipos de riego del campo. Esta delimitación establece el universo de activos considerados en la Fase 0 y entrega el marco operacional sobre el cual se desarrolla la priorización y el posterior análisis RCM.

El campo cuenta además con información climática utilizada para la programación del riego, en particular la evapotranspiración de referencia. Si bien esta información permite estimar la demanda hídrica del cultivo (Allen et al., 1998), el foco de esta investigación no es evaluar agronómicamente dicha demanda, sino analizar si el sistema logra ejecutar la aplicación de agua programada bajo condiciones reales de operación.

### 7.2.2. Jerarquía de activos y unidad de análisis

La definición de la jerarquía de activos permite ordenar el sistema según sus niveles físicos y funcionales, estableciendo qué elementos corresponden a activos mantenibles y en qué escala se

observa su desempeño. Este paso es necesario para aplicar el RCM, ya que el análisis debe asociar funciones, fallas funcionales, modos de falla y tareas de mantenimiento a un activo definido dentro de su contexto operacional (Moubray, 1997).

En el campo El Huaico, la jerarquía de análisis conecta la operación general del sistema con la aplicación final de agua en terreno. En el nivel superior se encuentra el campo, seguido por la caseta de riego, los equipos, los sectores y la unidad sector-día. La Figura 4 presenta esta organización, diferenciando entre la estructura mantenible del equipo y la escala donde se observa su desempeño operacional.

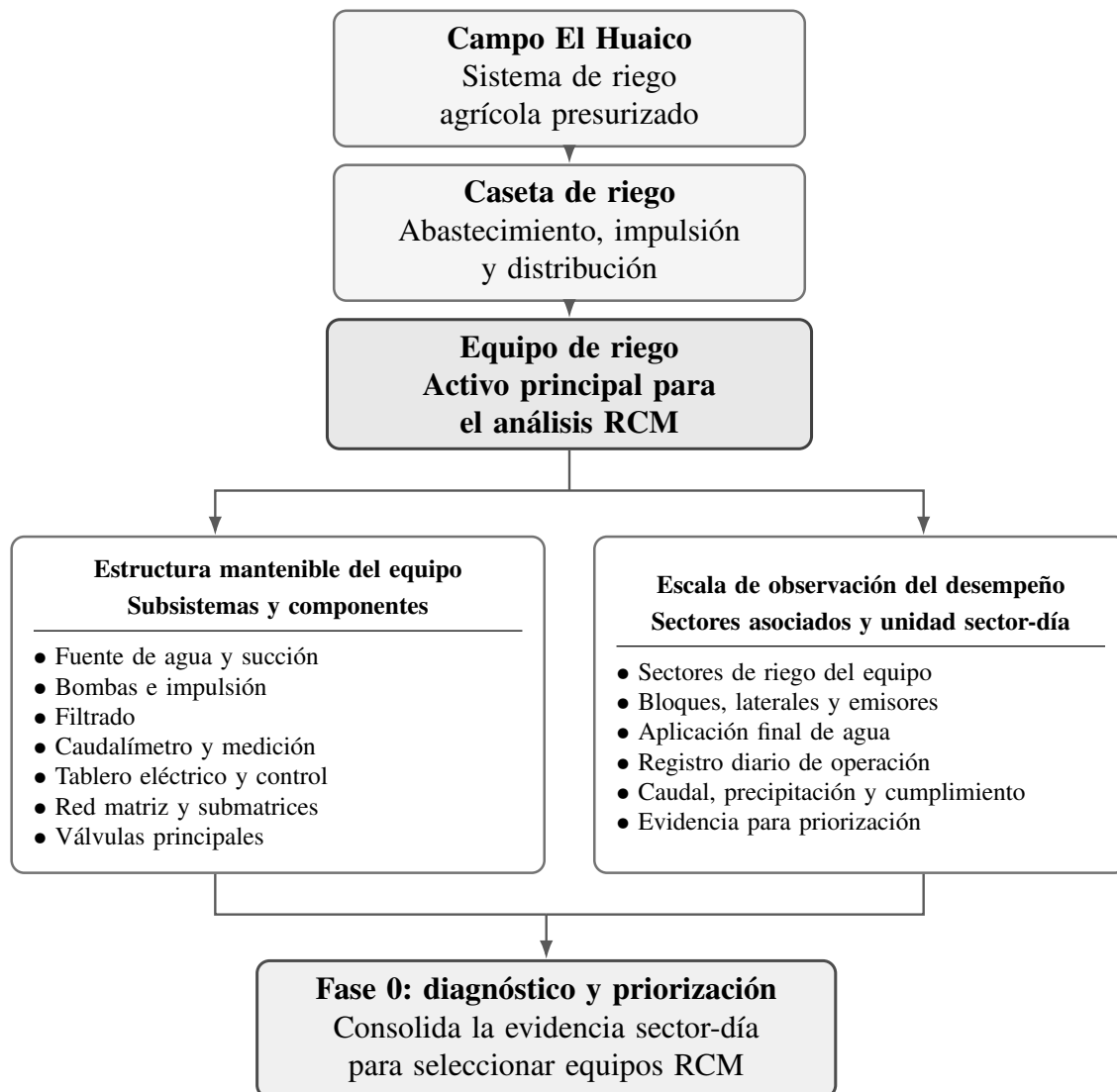


Figura 4: Jerarquía de análisis del sistema de riego del campo El Huaico. Elaboración propia.

La Tabla 1 resume la función analítica de cada nivel. Esta jerarquía permite distinguir entre el equipo de riego, entendido como el activo físico principal para el análisis RCM, y el sector de riego, entendido como la unidad funcional donde se manifiesta la aplicación de agua al cultivo.

Tabla 1: Niveles jerárquicos del sistema y función dentro del análisis.

| Nivel jerárquico       | Función dentro del análisis                                                                                                                                                                                               |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Campo El Huaico</b> | Corresponde al límite físico y operacional del sistema de riego analizado. Define el universo de equipos considerados en la Fase 0 y el contexto general de operación.                                                    |
| <b>Caseta de riego</b> | Representa el punto central de abastecimiento, impulsión y distribución del agua hacia la red de riego. Su operación condiciona el desempeño hidráulico de los equipos asociados.                                         |
| <b>Equipo de riego</b> | Constituye el activo físico principal para la aplicación de la metodología RCM. Agrupa subsistemas y componentes mantenibles, como bombas, filtros, tableros, válvulas, caudalímetros y elementos de conducción.          |
| <b>Sector de riego</b> | Corresponde a la unidad funcional donde se aplica el agua al cultivo. Permite observar el desempeño operacional del equipo a través de variables como caudal, precipitación, tiempo de riego y cumplimiento del programa. |
| <b>Sector-día</b>      | Es la unidad mínima del diagnóstico operacional. Integra el comportamiento de un sector en una fecha específica y permite construir indicadores comparables para la priorización de equipos.                              |

Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta estructura, el diagnóstico operacional se construye sobre la unidad sector-día, que reúne el comportamiento de un sector en una fecha específica. Esta escala permite construir indicadores comparables de caudal, precipitación y cumplimiento del programa, manteniendo la trazabilidad hacia el equipo correspondiente. De esta manera, la Fase 0 utiliza la información observada en los sectores para priorizar equipos, mientras que el análisis RCM posterior se aplica sobre el activo mantenible.

### 7.2.3. Fuentes de información operacional y antecedentes de terreno

La Fase 0 se construye a partir de cuatro fuentes de información, cada una con un rol distinto dentro del diagnóstico. Antes de describir su uso conjunto, conviene presentar qué es y qué aporta cada una.

La primera es **Agronic**, el sistema de control y telemetría del riego. Registra de forma

automática la ejecución real de cada riego: horarios, tiempos de operación, volumen aplicado, lámina, caudal real y teórico, desfase de caudal y fugas de contador. Constituye la fuente principal del diagnóstico, ya que describe lo que efectivamente ocurrió en terreno.

La segunda es el **Maestro de Riego**, el registro estructural del sistema. Contiene la configuración de cada activo: campo, equipo, sector, superficie, especie, variedad, programa, caudal teórico y precipitación de referencia inicial. No describe la operación, sino la estructura contra la cual esta se compara, por lo que aporta los parámetros de referencia del análisis.

La tercera es **BaumSystem**, que reúne los antecedentes levantados en terreno: aforos de emisores, mediciones de presión, observaciones y eventos operacionales registrados durante la temporada. Se utiliza como fuente complementaria, para apoyar la interpretación de las desviaciones, validar referencias cuando existe consistencia con Agronic y contrastar el ranking con la recurrencia de eventos e intervenciones.

La cuarta es la **programación de riego**, que define las horas planificadas por sector y fecha a partir del requerimiento hídrico, el coeficiente de cultivo, la eficiencia y la precipitación de referencia. Se incorpora como referencia de gestión, ya que permite evaluar si el tiempo de riego ejecutado se ajusta al programado. La comparación se centra en las horas de riego porque son la variable que la programación define de forma operativa para cada sector y fecha, mientras que las diferencias de caudal o de intensidad de aplicación se capturan mediante los indicadores hidráulicos descritos más adelante.

Estas cuatro fuentes no representan el mismo tipo de información y esa diferencia es la que permite cruzarlas de forma complementaria.

El cruce de estas fuentes permite construir una visión integrada del comportamiento hídrico y operativo del campo. Al contrastar la ejecución registrada automáticamente con los parámetros

de referencia, la programación y los antecedentes de terreno, el diagnóstico reduce el riesgo de interpretar un problema de registro, configuración o medición como una falla física del sistema. De esta forma, la información queda organizada para apoyar una priorización trazable de equipos antes de aplicar el análisis RCM.

#### **7.2.4. Construcción de la base operacional sector-día**

Sobre la unidad de análisis definida, se construye una base operacional consolidada que reúne, para cada sector y fecha, los registros de riego ejecutado, los parámetros de referencia, la programación diaria y los antecedentes disponibles. Su objetivo es transformar registros operacionales dispersos en observaciones comparables, manteniendo la trazabilidad hacia el equipo de riego correspondiente.

La construcción de la base comienza con la vinculación entre los registros de Agronic y la información estructural del Maestro de Riego. Luego, los riegos registrados se consolidan por sector y fecha, agrupando variables como tiempo de operación, volumen aplicado, caudal real, caudal teórico y lámina registrada. Este procesamiento permite pasar desde eventos individuales de riego hacia una base diaria de diagnóstico, adecuada para identificar recurrencias y priorizar equipos antes del análisis RCM en profundidad.

El tiempo de riego registrado en Agronic se procesa en segundos. Para expresarlo en una unidad operacional comparable, las horas reales de riego se calculan según la Ecuación 4.

$$H_{\text{real}} = \frac{T_{\text{riego}}}{3600}, \quad (4)$$

donde  $H_{\text{real}}$  corresponde a las horas reales de riego y  $T_{\text{riego}}$  corresponde al tiempo total de

riego registrado en segundos.

A partir de esta duración y de la lámina aplicada, se calcula la precipitación operacional registrada por Agronic, según la Ecuación 5. Este indicador representa la intensidad real de aplicación del agua y permite compararla posteriormente con la precipitación de referencia del sector.

$$\text{Prec}_{\text{Agronic}} = \frac{L_{\text{riego}}}{H_{\text{real}}}, \quad (5)$$

donde  $\text{Prec}_{\text{Agronic}}$  corresponde a la precipitación operacional en mm/h,  $L_{\text{riego}}$  corresponde a la lámina total aplicada en mm y  $H_{\text{real}}$  corresponde a las horas reales de riego.

La desviación de caudal se calcula comparando el caudal real con el caudal teórico del sector, según la Ecuación 6. Se conserva el signo de la desviación, ya que este permite distinguir entre sobrecaudal y subcaudal, condiciones que pueden tener causas e implicancias operacionales distintas.

$$\text{Desv}_Q = \left( \frac{Q_{\text{real}} - Q_{\text{teórico}}}{Q_{\text{teórico}}} \right) \times 100. \quad (6)$$

Un valor positivo de  $\text{Desv}_Q$  indica sobrecaudal, mientras que un valor negativo indica subcaudal. Así, el indicador permite evaluar tanto la magnitud como el sentido de la desviación observada. Todos los indicadores operacionales descritos (desviación de caudal, precipitación operacional y desviación de precipitación) se calculan a nivel de sector-día, es decir, quedan indexados por sector y fecha, manteniendo la trazabilidad hacia el equipo correspondiente.

### 7.2.5. Definición de la precipitación de referencia operacional

Para evaluar si un sector aplica el agua con la intensidad esperada, el diagnóstico necesita una precipitación de referencia confiable contra la cual comparar la operación. El valor disponible de entrada es la precipitación teórica del Maestro de Riego; sin embargo, este puede no representar la condición operacional real por dos tipos de causas. La primera es física: la precipitación de un sector resulta del caudal de sus emisores sobre la superficie regada, y ese caudal no es constante. En riego presurizado, el caudal de cada emisor varía con la presión de operación según su curva característica y se degrada en el tiempo por desgaste y obturación parcial, lo que altera tanto la lámina aplicada como su uniformidad respecto del valor de diseño (Keller y Bliesner, 1990). La segunda es de dato: la superficie, el caudal teórico o la precipitación inicial cargados en el Maestro pueden estar desactualizados o contener errores, de modo que el valor nominal no corresponda a la configuración vigente del sector.

Para abordar esta limitación, se define una precipitación de referencia operacional, denominada  $P_{ref}$ , expresada en mm/h. Esta referencia mantiene como base el valor del Maestro de Riego, pero permite reemplazarlo por una estimación obtenida desde aforos de terreno cuando existe respaldo suficiente. Para ello, primero se identifican riegos hidráulicamente estables en Agronic, definidos como aquellos cuya desviación absoluta de caudal es menor o igual a 5 %. En esos casos, la precipitación operacional calculada desde Agronic se considera una señal representativa del comportamiento del sector bajo condiciones estables de caudal.

Luego, la precipitación estimada desde aforos de terreno se compara con la referencia obtenida desde la operación registrada. Esta comparación se realiza utilizando una base depurada de valores atípicos. Si ambas referencias difieren en menos de un 5 %, se adopta la precipitación es-

timada desde aforos como referencia operacional. En caso contrario, se mantiene la precipitación del Maestro de Riego y el sector queda señalado para revisión.

De esta forma, los aforos no reemplazan automáticamente al dato maestro, sino que se incorporan solo cuando existe consistencia suficiente con la evidencia operacional disponible.

La regla utilizada se presenta en la Ecuación 7.

$$Prec_{ref} = \begin{cases} Prec_{aforo}, & \text{si } \left| \frac{Prec_{aforo} - Prec_{Agronic, estable}}{Prec_{Agronic, estable}} \right| \leq 0,05 \\ Prec_{Maestro}, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad (7)$$

A partir de esta referencia se calcula la desviación de la precipitación operacional, según la Ecuación 8.

$$Desv_{prec} = \left( \frac{Prec_{Agronic} - Prec_{ref}}{Prec_{ref}} \right) \times 100, \quad (8)$$

donde  $Desv_{prec}$  corresponde a la desviación porcentual de la precipitación respecto de la referencia operacional. Este indicador permite evaluar si la intensidad real de aplicación se encuentra por sobre o por debajo de lo esperado, diferenciándola del cumplimiento del tiempo programado y del comportamiento del caudal registrado.

#### 7.2.6. Clasificación de desviaciones operacionales

Las desviaciones de caudal y precipitación se clasifican mediante un umbral de tolerancia operacional de  $\pm 10\%$ . Este criterio permite diferenciar variaciones menores de desviaciones relevantes para el diagnóstico. Además, se identifica como desviación fuerte toda observación cuya magnitud absoluta sea mayor o igual a  $20\%$ , con el fin de distinguir los casos de mayor intensidad

dentro del análisis.

Tabla 2: Criterios de clasificación para caudal y precipitación operacional.

| Criterio                   | Clasificación operacional                       |
|----------------------------|-------------------------------------------------|
| $ Desv_Q  \leq 10 \%$      | Caudal dentro de rango operacional              |
| $Desv_Q > 10 \%$           | Sobrecaudal                                     |
| $Desv_Q < -10 \%$          | Subcaudal                                       |
| $ Desv_Q  \geq 20 \%$      | Desviación fuerte de caudal                     |
| $ Desv_{prec}  \leq 10 \%$ | Precipitación dentro de rango operacional       |
| $Desv_{prec} > 10 \%$      | Precipitación mayor a la referencia operacional |
| $Desv_{prec} < -10 \%$     | Precipitación menor a la referencia operacional |
| $ Desv_{prec}  \geq 20 \%$ | Desviación fuerte de precipitación              |

Fuente: Elaboración propia.

El cumplimiento del programa de riego se evalúa comparando las horas efectivamente ejecutadas con las horas programadas para cada sector y fecha. Este indicador no describe directamente el comportamiento hidráulico del sistema, sino la relación entre la operación realizada y la planificación definida. Por ello, se utiliza como antecedente de gestión operacional, ya que una diferencia entre lo programado y lo ejecutado puede responder a ajustes de programación, decisiones de terreno, cortes eléctricos, riegos manuales u otras condiciones propias de la operación diaria.

Esta distinción es relevante en sistemas de riego agrícola, donde el desempeño no depende solo del diseño físico, sino también de la organización, operación y mantenimiento del servicio de aplicación de agua (Huppert et al., 2003; Svendsen y Huppert, 2003). La desviación porcentual del programa de riego se calcula según la Ecuación 9.

$$Desv_H = \left( \frac{H_{\text{real}} - H_{\text{programada}}}{H_{\text{programada}}} \right) \times 100, \quad (9)$$

donde  $Desv_H$  corresponde a la desviación porcentual del programa de riego,  $H_{\text{real}}$  a las

horas efectivamente ejecutadas y  $H_{\text{programada}}$  a las horas programadas para el sector.

Cuando  $H_{\text{programada}} = 0$ , la desviación porcentual no se calcula mediante la Ecuación 9. En estos casos, si existe riego real, el registro se clasifica como riego no programado; si no existe riego real, se considera que no existe incumplimiento del programa para el sector-día.

### **7.2.7. Verificación de consistencia caudal-precipitación**

La verificación de consistencia caudal-precipitación permite contrastar las dos señales principales del diagnóstico hidráulico. Aunque ambas se relacionan con la entrega de agua, representan aspectos distintos del desempeño: el caudal describe el flujo registrado durante la operación, mientras que la precipitación expresa la intensidad de aplicación resultante a partir de la lámina y el tiempo efectivo de riego.

La comparación se realiza observando el sentido de ambas desviaciones. Cuando caudal y precipitación se desvían en la misma dirección, el registro entrega una señal más consistente de mayor o menor entrega de agua. En cambio, cuando ambas variables se comportan en sentidos opuestos, el caso se considera una alerta de revisión, ya que puede estar asociado a diferencias en registros, referencias hidráulicas, superficie, tiempo de riego u homologación de datos. Los patrones de consistencia se clasifican según la Tabla 3.

Tabla 3: Clasificación de consistencia entre caudal y precipitación operacional.

| Condición observada                               | Clasificación               | Interpretación metodológica                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Subcaudal y precipitación menor a la referencia   | Coherente: menor entrega    | Patrón compatible con una menor entrega hidráulica o menor intensidad de aplicación.                                                            |
| Sobrecaudal y precipitación mayor a la referencia | Coherente: mayor entrega    | Patrón compatible con una mayor entrega hidráulica o mayor intensidad de aplicación.                                                            |
| Subcaudal y precipitación mayor a la referencia   | Contradictorio              | Caso que requiere revisar caudal registrado, lámina aplicada, tiempo de riego, superficie, referencia de precipitación u homologación de datos. |
| Sobrecaudal y precipitación menor a la referencia | Contradictorio              | Caso que requiere revisar caudal registrado, lámina aplicada, tiempo de riego, superficie, referencia de precipitación u homologación de datos. |
| Solo caudal desviado                              | Parcial: solo caudal        | Señal parcial asociada al caudal registrado.                                                                                                    |
| Solo precipitación desviada                       | Parcial: solo precipitación | Señal parcial asociada a la intensidad de aplicación o a la referencia operacional de precipitación.                                            |
| Caudal y precipitación dentro de rango            | Sin desviación relevante    | No se observa desviación hidráulica relevante para el sector-día.                                                                               |

Fuente: Elaboración propia.

Los patrones coherentes se utilizan como evidencia operacional de pérdida o aumento de desempeño hidráulico, según el sentido de la desviación observada. Los patrones contradictorios, en cambio, se tratan como casos que requieren revisión antes de ser interpretados técnicamente. Esta verificación permite separar señales hidráulicas consistentes de registros que podrían estar influidos por problemas de información o configuración operacional. De esta manera, la consistencia entre caudal y precipitación fortalece la trazabilidad del diagnóstico y permite sustentar las decisiones posteriores sobre evidencia más robusta, en línea con los principios de gestión de activos y análisis funcional del mantenimiento (International Organization for Standardization, 2014a; Alves et al., 2015).

### **7.2.8. Fugas de contador**

Una fuga corresponde a un paso de agua no previsto en el sistema, es decir, a un flujo registrado sin una apertura sectorial que lo justifique según la operación programada. Agronic entrega un registro de estas fugas detectadas a nivel de medidor, el cual se incorpora como antecedente operacional dentro del diagnóstico sector-día.

Sin embargo, el registro de fuga está asociado a un contador y no directamente a un sector específico. Por esta razón, para integrarlo al análisis se revisan los sectores vinculados al medidor correspondiente y el antecedente se considera solo cuando la fuga ocurre de manera simultánea con un riego registrado para alguno de ellos.

Dado que un mismo contador puede estar asociado a más de un sector, la fuga no se atribuye directamente como volumen propio de un sector específico. Se utiliza como señal de posible paso de agua no explicado, que puede relacionarse con una fuga física, una válvula con paso de agua, un riego manual no registrado o diferencias de configuración entre el contador, los sectores y el Maestro de Riego. De esta forma, las fugas de contador aportan una señal operacional diaria asociada al paso de agua registrado por los medidores, sin constituir por sí solas una falla física confirmada.

### **7.2.9. Eventos operacionales de terreno**

Un evento operacional es un antecedente puntual levantado en terreno, correspondiente a una falla observada, una reparación, una intervención, una observación o una condición específica detectada durante la temporada. A diferencia de los registros continuos y automáticos de Agronic, los eventos se registran manualmente en BaumSystem por el personal de terreno, por lo que consti-

tuyen una fuente complementaria para contrastar el comportamiento operacional con antecedentes directos de operación y mantenimiento.

Por su naturaleza discreta, los eventos no se utilizan como variable principal del puntaje diario sector-día, sino como una capa complementaria de contraste para interpretar la recurrencia de fallas e intervenciones. Esta capa permite identificar equipos que concentran carga de mantenimiento o antecedentes repetidos de terreno, incluso cuando dicha recurrencia no se refleja necesariamente como una desviación hidráulica sostenida en el desempeño agregado del equipo.

Los eventos se analizan de forma consolidada durante la temporada, separándolos según tres criterios:

- **Prioridad.** Refleja la urgencia con que el evento debe atenderse, según su efecto sobre la continuidad del riego, y se utiliza como ponderador en el ranking de eventos.
  - *Urgente:* evento con efecto funcional inmediato o potencialmente relevante sobre la operación del riego, que requiere intervención correctiva prioritaria, como la rotura de una matriz o una válvula que deja un sector sin regar.
  - *Media:* evento que requiere seguimiento o intervención, pero sin implicar necesariamente la detención inmediata del riego ni una pérdida crítica de disponibilidad.
  - *Baja:* evento de menor impacto operacional inmediato, asociado a observaciones, condiciones no críticas o requerimientos de revisión.
- **Categoría.** Agrupa los eventos según el subsistema afectado, lo que permite distinguir el ámbito técnico sobre el cual se concentra la intervención.
  - *Hidráulica:* eventos sobre los componentes de conducción y entrega de agua, como

válvulas, matrices, submatrices, líneas y emisores; incluye fugas, roturas y obstrucciones.

- *Señales o telemetría:* eventos asociados a la comunicación, monitoreo remoto o ejecución de señales de apertura y cierre, como fallas de sensores, solenoides o transmisión de información.
- *Centro de control o eléctrico:* eventos en el tablero, la alimentación eléctrica o los elementos de control del equipo.

- **Tipo funcional.** Describe la naturaleza de la intervención realizada sobre el componente, como reparación, reemplazo, inspección o ajuste, lo que aporta contexto sobre el trabajo de mantenimiento efectivamente ejecutado.

A partir de la prioridad de cada evento se construye un puntaje complementario de eventos por equipo, que ordena el ranking complementario utilizado como segunda ruta de selección. Para cada equipo se asignan 3 puntos a los eventos urgentes, 2 puntos a los de prioridad media y 1 punto a los de prioridad baja, según la Ecuación 10.

$$P_{ev} = 3N_{urgente} + 2N_{media} + 1N_{baja}, \quad (10)$$

donde  $P_{ev}$  corresponde al puntaje complementario de eventos del equipo, y  $N_{urgente}$ ,  $N_{media}$  y  $N_{baja}$  corresponden al número de eventos registrados en cada nivel de prioridad. Los eventos que no pueden asignarse de manera unívoca a un equipo se mantienen separados y no se incorporan al ranking por equipo, para evitar atribuciones incorrectas.

Esta clasificación permite identificar equipos con alta carga de intervenciones, aun cuan-

do su desempeño hidráulico promedio no presente una degradación sostenida. De este modo, los eventos aportan una medida complementaria de carga de mantenimiento a nivel de equipo, permitiendo contrastar el ranking operacional con la recurrencia de intervenciones de terreno y construir una segunda ruta de selección para el análisis RCM.

#### 7.2.10. Puntaje operacional sector-día

A partir de las clasificaciones anteriores se construye un puntaje operacional a nivel sector-día, denominado  $P_{sd}$ . Este puntaje resume en una métrica comparable la evidencia disponible para un sector en una fecha, integrando cuatro componentes: el patrón de consistencia caudal-precipitación, la severidad de las desviaciones, las fugas de contador y el cumplimiento del programa de riego.

$$P_{sd} = P_{\text{patrón}} + P_{\text{sev}} + P_{\text{fuga}} + P_{\text{prog}}, \quad (11)$$

donde  $P_{\text{patrón}}$  corresponde al puntaje asociado al patrón caudal-precipitación,  $P_{\text{sev}}$  al puntaje por severidad de la desviación,  $P_{\text{fuga}}$  al puntaje por fugas de contador y  $P_{\text{prog}}$  al puntaje por cumplimiento del programa de riego.

**7.2.10.1. Ponderación del patrón.** El componente principal,  $P_{\text{patrón}}$ , pondera el tipo de patrón caudal-precipitación según un criterio de interpretabilidad operacional: cuán consistente es la señal como evidencia de una alteración en la entrega de agua. Bajo este criterio, los patrones se ordenan jerárquicamente y cada nivel recibe la mitad del peso del anterior, dando origen a la escala 8-4-2-1 presentada en la Tabla 4.

Tabla 4: Ponderación del patrón caudal-precipitación en el puntaje sector-día.

| Patrón             | Peso | Justificación                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Coherente          | 8    | Caudal y precipitación se desvían en el mismo sentido. Corresponde a la señal más completa dentro del diagnóstico, ya que ambas variables indican una mayor o menor entrega de agua.                                                         |
| Solo caudal        | 4    | Señal parcial asociada al flujo registrado. Recibe la mitad del peso del patrón coherente, ya que solo una de las dos variables principales presenta desviación.                                                                             |
| Solo precipitación | 2    | Señal parcial asociada a la intensidad de aplicación o a la referencia operacional de precipitación. Recibe menor peso que solo caudal, debido a que puede estar influida por diferencias en la referencia utilizada para evaluar el sector. |
| Contradicción      | 1    | Caudal y precipitación se desvían en sentidos opuestos. Se interpreta como una alerta de revisión de datos, referencias o configuración, por lo que recibe el peso mínimo.                                                                   |

Fuente: Elaboración propia.

La distinción entre *solo caudal* y *solo precipitación* es deliberada. Aunque ambos corresponden a señales parciales, no representan el mismo tipo de evidencia: la desviación de solo caudal se relaciona directamente con el flujo registrado durante la operación, mientras que la desviación de solo precipitación puede estar influida por la intensidad de aplicación calculada o por la referencia operacional utilizada para evaluar el sector. Por esta razón, ponderarlas de igual forma podría sobrerrepresentar señales cuyo origen requiere revisión de información antes de ser interpretadas como pérdida de desempeño hidráulico.

**7.2.10.2. Componentes complementarios.** Los tres componentes restantes capturan evidencia adicional que no forma parte del patrón caudal-precipitación:

- $P_{sev}$  corresponde a la severidad de las desviaciones. Suma 5 puntos por cada variable (caudal o precipitación) cuya desviación sea fuerte, es decir, de magnitud absoluta mayor o igual a 20 %. En los casos contradictorios, donde la desviación no se interpreta directamente como

pérdida de desempeño, la severidad se acota a un valor fijo de 3 puntos.

- $P_{fuga}$  corresponde a las fugas de contador asociadas al sector-día. Suma el número de eventos de fuga registrados, con un tope de 3 puntos. Este tope evita que un único día con múltiples registros de fuga domine el puntaje del equipo. La fuga se trata como antecedente de posible paso de agua no asignado, no como falla física confirmada.
- $P_{prog}$  corresponde al cumplimiento del programa de riego. Suma 3 puntos cuando el incumplimiento del programa coincide con un patrón de desviación hidráulica, y 1 punto cuando corresponde a un incumplimiento aislado. Esta distinción diferencia un desvío de programa acompañado por una señal hidráulica de uno principalmente operativo.

**7.2.10.3. Origen de las ponderaciones.** Los pesos se establecieron mediante criterio experto, considerando la valoración operacional de un ingeniero agrónomo de Garcés Fruit con experiencia directa en el manejo del riego del campo. La escala se definió de modo que el orden relativo entre patrones reflejara su relevancia para el diagnóstico, en línea con el uso de juicio experto para la evaluación de criticidad descrito en el marco teórico (Sección 6.9). La priorización no depende de una estimación probabilística de falla, sino de una jerarquía metodológica que ordena la fuerza e interpretabilidad de las señales disponibles.

**7.2.10.4. Alcance del puntaje.** El propósito de  $P_{sd}$  es ordenar los registros diarios según la fuerza de la evidencia operacional, permitiendo identificar dónde se concentran las desviaciones relevantes dentro del sistema. Por construcción, no corresponde a una probabilidad de falla ni a una criticidad definitiva del activo. Es una métrica de focalización cuyo objetivo es seleccionar qué equipos justifican un análisis RCM posterior. La confirmación de si una señal corresponde a una

falla física, a una condición operacional o a un problema de información se aborda en el análisis funcional posterior y mediante la revisión de antecedentes complementarios.

### 7.2.11. Agregación semanal y ranking operacional de equipos

Para evaluar la recurrencia de las desviaciones y reducir el efecto de registros diarios aislados, los resultados sector-día se agregan a nivel semanal. Esta escala permite identificar patrones sostenidos en el tiempo, diferenciando eventos puntuales de comportamientos repetidos que pueden justificar una revisión de mantenimiento.

Como control complementario, la precipitación semanal se recalcula a partir de la lámina total aplicada y el tiempo total de riego, según la Ecuación 12. De esta forma se evita utilizar promedios simples de precipitaciones diarias, que podrían distorsionarse por riegos de corta duración.

$$Prec_{semana} = \frac{\sum L_{riego}}{\sum T_{riego}/3600}, \quad (12)$$

donde  $Prec_{semana}$  corresponde a la precipitación semanal, expresada en mm/h;  $L_{riego}$  a la lámina aplicada en cada riego, expresada en mm; y  $T_{riego}$  al tiempo de riego registrado en segundos.

El ranking operacional se construye a nivel de equipo combinando dos términos: el puntaje operacional acumulado de todos sus registros sector-día y la recurrencia semanal de cada patrón. Para ello, se calcula el puntaje recurrente operacional, definido en la Ecuación 13.

$$P_{rec,op} = P_{op,total} + 8 N_{sem,coh} + 4 N_{sem,soloQ} + 2 N_{sem,soloPrec} + 1 N_{sem,contrad} + 3 N_{sem,fuga} + 1 N_{sem,incump}, \quad (13)$$

donde  $P_{rec,op}$  corresponde al puntaje recurrente operacional del equipo durante el período

analizado;  $P_{op,total}$  corresponde a la suma del puntaje operacional sector-día del equipo; y cada término  $N$  representa el número de semanas en que el equipo presentó, en al menos un día, el patrón o antecedente correspondiente.

El puntaje recurrente integra dos dimensiones complementarias. El primer término,  $P_{op,total}$ , mide la intensidad acumulada de la evidencia diaria. Los términos de recurrencia semanal miden en cuántas semanas distintas reaparece cada patrón, lo que permite distinguir un episodio concentrado de una condición repetida durante la temporada. Los pesos de recurrencia de los patrones caudal-precipitación conservan la misma jerarquía 8-4-2-1 definida para el puntaje diario, de modo que la prioridad relativa de cada patrón sea consistente en ambas escalas.

A estos patrones se suman dos antecedentes complementarios con peso propio: la fuga de contador, ponderada con 3 puntos por semana, y el incumplimiento del programa de riego, ponderado con 1 punto por semana. La fuga se incorpora como señal de posible paso de agua no asignado, mientras que el incumplimiento se incorpora como antecedente de gestión operacional.

El ranking final se obtiene ordenando los equipos de mayor a menor  $P_{rec,op}$ . Este indicador no busca estimar una tasa estadística de falla ni una criticidad definitiva del activo, sino identificar los equipos que concentran la mayor carga operacional de desviaciones durante la temporada. Por ello, se utiliza como herramienta de focalización para seleccionar los casos que serán analizados posteriormente mediante la metodología RCM.

#### **7.2.12. Análisis de asociación entre eventos de terreno y patrones operacionales**

Además del ranking operacional y del ranking complementario de eventos, se realiza un análisis de asociación entre ambas capas de información. El objetivo de este análisis es evaluar si los eventos registrados en terreno tienden a coincidir con determinados patrones operaciona-

les detectados en la Fase 0, y distinguir si ambas fuentes capturan el mismo tipo de problema o dimensiones complementarias del sistema.

El análisis se desarrolla en dos escalas. Primero, a nivel de equipo, se contrasta el puntaje recurrente operacional con el puntaje complementario de eventos (Ecuación 10) mediante el coeficiente de correlación de Spearman. Este coeficiente se utiliza porque compara el orden relativo de los equipos en ambos rankings, sin asumir una relación lineal entre los puntajes. Dado que el número de equipos del campo es reducido, esta correlación se interpreta de forma descriptiva y no como una prueba concluyente de dependencia o independencia entre ambas capas.

En segundo lugar, se realiza un análisis a nivel sector-día para evaluar la asociación entre la ocurrencia de eventos de terreno y la presencia de patrones operacionales específicos. Para ello, cada sector-día se representa mediante dos tipos de variables binarias: una variable que indica si el sector-día presenta un patrón operacional determinado, y otra que indica si existe al menos un evento de terreno asociado dentro de una ventana temporal alrededor de la fecha analizada.

La variable de evento se define para distintas ventanas temporales  $w$ , considerando  $w \in \{0, 1, 3, 7\}$  días. Para cada sector  $s$  y fecha  $d$ , se define:

$$E_{s,d}^{(w)} = \begin{cases} 1, & \text{si existe al menos un evento asociado entre } d - w \text{ y } d + w, \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad (14)$$

La ventana  $w = 0$  representa coincidencia en el mismo día del evento, mientras que las ventanas  $w = 1$ ,  $w = 3$  y  $w = 7$  permiten evaluar si la asociación se mantiene al ampliar el período de observación alrededor del evento. Los eventos de infraestructura compartida o sin asignación

clara a un sector o equipo se excluyen de este contraste sector-día, manteniéndose solo como antecedente complementario.

Para cada patrón operacional se construye una tabla de contingencia de  $2 \times 2$ , comparando la presencia o ausencia del patrón con la presencia o ausencia de evento dentro de la ventana definida. La asociación se evalúa mediante una prueba de  $\chi^2$  de independencia. Cuando la frecuencia esperada de alguna celda es inferior a 5, se utiliza la prueba exacta de Fisher. Dado que se evalúan múltiples patrones y ventanas, los valores  $p$  se corrigen por comparaciones múltiples mediante el procedimiento de Benjamini-Hochberg, controlando la tasa de falsos descubrimientos o FDR (Benjamini y Hochberg, 1995).

La magnitud de la asociación se expresa como el cambio porcentual de la prevalencia del patrón cerca de un evento respecto de su prevalencia basal en el campo, según la Ecuación 15.

$$\Delta_k^{(w)} = \left( \frac{\Pr \left( I_{s,d}^{(k)} = 1 \mid E_{s,d}^{(w)} = 1 \right)}{\Pr \left( I_{s,d}^{(k)} = 1 \right)} - 1 \right) \times 100, \quad (15)$$

donde  $\Delta_k^{(w)}$  corresponde al cambio porcentual de prevalencia del patrón  $k$  cerca de un evento,  $I_{s,d}^{(k)}$  indica la presencia del patrón operacional  $k$  en el sector  $s$  y fecha  $d$ , y  $E_{s,d}^{(w)}$  indica la existencia de un evento asociado dentro de la ventana temporal  $w$ .

Un valor positivo de  $\Delta_k^{(w)}$  indica que el patrón se encuentra sobre-representado cerca de eventos de terreno, mientras que un valor negativo indica que el patrón se encuentra sub-representado. Este análisis no busca demostrar causalidad entre un evento y un patrón operacional, sino evaluar si ambos tipos de evidencia tienden a coincidir y si su relación aporta información para la selección de equipos que serán analizados mediante la metodología RCM. Los resultados de este análisis se presentan en la Sección 8.1.4.

### 7.2.13. Criterios de selección de equipos para análisis RCM

La selección de equipos para el análisis RCM se realiza mediante dos rutas complementarias. La primera corresponde al desempeño operacional observado en la Fase 0, mientras que la segunda considera la recurrencia de eventos e intervenciones registradas en terreno. Esta separación permite incluir equipos que presentan desviaciones operacionales sostenidas, pero también aquellos con intervenciones repetitivas sobre componentes específicos, aun cuando su desempeño agregado no evidencie una degradación persistente durante la temporada.

Tabla 5: Rutas de selección para la aplicación del análisis RCM.

| Ruta       | Criterio de entrada                     | Interpretación metodológica                                                                                                                                                                             |
|------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ruta A     | Desempeño operacional sostenido         | Identifica equipos con concentración recurrente de desviaciones operacionales, señales hidráulicas, inconsistencias de información, fugas de contador o incumplimientos del programa de riego.          |
| Ruta B     | Recurrencia de eventos o intervenciones | Identifica equipos con alta carga de eventos de terreno, reparaciones o intervenciones repetitivas, aunque estas no necesariamente se reflejen como una degradación agregada del desempeño operacional. |
| Ruta A + B | Convergencia entre desempeño y eventos  | Identifica equipos donde la evidencia operacional y los registros de terreno apuntan al mismo activo, reforzando su selección para el análisis RCM.                                                     |

Fuente: Elaboración propia.

La Ruta A selecciona equipos ubicados en las posiciones superiores del ranking operacional. Dentro de esta ruta pueden existir casos con patrones hidráulicos coherentes, donde caudal y precipitación se desvían en el mismo sentido, y casos con señales parciales o inconsistencias que requieren una revisión más detallada de datos, referencias o condiciones de operación.

La Ruta B selecciona equipos con alta recurrencia de eventos de terreno, reparaciones o intervenciones correctivas. Esta ruta permite incorporar problemas de confiabilidad de componen-

tes que podrían no reflejarse claramente en el ranking operacional, pero que sí generan carga de mantenimiento durante la temporada.

La combinación de ambas rutas permite seleccionar equipos con problemáticas distintas y evita que el análisis RCM se limite a un solo tipo de señal. Adicionalmente, la selección considera la diversidad de los tipos de caso, de modo que los equipos escogidos representen situaciones de naturaleza diferente y el análisis pueda demostrar la capacidad del enfoque para distinguirlas. Así, la Fase 0 entrega un criterio de focalización basado en evidencia, mientras que el análisis RCM posterior profundiza en las funciones, fallas funcionales, modos de falla, causas probables, efectos, consecuencias y tareas de mantenimiento correspondientes a cada activo seleccionado (Moubray, 1997; Alves et al., 2015).

### **7.3. Aplicación de la metodología RCM mediante las siete preguntas**

Una vez finalizada la Fase 0 y seleccionados los equipos según las rutas definidas, se aplica la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad sobre los activos seleccionados para el análisis. Esta etapa busca estructurar las decisiones de mantenimiento a partir de las funciones que debe cumplir cada equipo, las formas en que puede dejar de cumplirlas, sus modos de falla, causas probables, efectos, consecuencias y tareas aplicables.

El análisis se desarrolla siguiendo las siete preguntas fundamentales del RCM propuestas por Moubray (1997). Estas preguntas permiten ordenar el diagnóstico desde una perspectiva funcional, evitando iniciar el análisis directamente desde componentes o tareas predefinidas. El punto de partida no es qué elemento debe intervenir, sino qué función debe cumplir el equipo en su contexto operacional y qué consecuencias tendría que dicha función no se cumpla.

En esta investigación, la metodología RCM se aplica a nivel de equipo de riego, que corresponde al activo físico principal definido en la jerarquía del sistema. El análisis considera también sus subsistemas y componentes relevantes, tales como impulsión, filtrado, medición de caudal, control eléctrico, programación, red de distribución, válvulas, laterales y emisores. La evidencia generada en la Fase 0 orienta este análisis, vinculando las desviaciones operacionales, las fugas de contador y los eventos de terreno con posibles fallas funcionales, modos de falla y causas probables.

El enfoque específico del análisis depende de la ruta de entrada del equipo seleccionado. En los casos provenientes de la Ruta A, el análisis se orienta a comprender pérdidas de desempeño operacional, señales hidráulicas coherentes o inconsistencias asociadas a datos y referencias. En los casos provenientes de la Ruta B, el foco se sitúa en la recurrencia de eventos o intervenciones sobre componentes específicos. Cuando ambas rutas convergen, el análisis considera simultáneamente la evidencia operacional y los registros de terreno.

Tabla 6: Siete preguntas del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad aplicadas al sistema de riego.

| Nº | Pregunta RCM                                                                               | Aplicación en el sistema de riego                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | ¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño del activo en su contexto operacional? | Define qué debe lograr el equipo de riego, considerando caudal, presión, precipitación, continuidad operacional y ejecución del programa de riego.                                                                                                                                                                 |
| 2  | ¿De qué manera puede fallar en el cumplimiento de sus funciones?                           | Identifica las fallas funcionales, entendidas como la incapacidad del equipo para cumplir total o parcialmente sus funciones esperadas.                                                                                                                                                                            |
| 3  | ¿Qué causa cada falla funcional?                                                           | Identifica los modos de falla, entendidos como la manera específica en que cada función deja de cumplirse, y para cada uno de ellos sus causas probables. En el sistema de riego, esto puede asociarse a subsistemas y componentes como impulsión, filtrado, medición, control, distribución o aplicación de agua. |
| 4  | ¿Qué ocurre cuando se presenta cada modo de falla?                                         | Describe los efectos observables en la operación, tales como desviaciones de caudal, variaciones de precipitación, baja presión, falta de riego o aplicación irregular de agua.                                                                                                                                    |
| 5  | ¿Qué consecuencias tiene cada falla?                                                       | Evalúa el impacto operacional, productivo, económico o de disponibilidad asociado a cada falla funcional o modo de falla.                                                                                                                                                                                          |
| 6  | ¿Qué puede hacerse para prevenir o anticipar la falla?                                     | Define tareas de mantenimiento, inspección, monitoreo o control operacional que permitan reducir la probabilidad de ocurrencia o detectar anticipadamente una condición relevante.                                                                                                                                 |
| 7  | ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea preventiva adecuada?                        | Establece acciones alternativas, tales como rediseño, cambio de estrategia, mantenimiento correctivo planificado, mejora de información o revisión operacional.                                                                                                                                                    |

Fuente: Elaboración propia con base en Moubray (1997).

A partir de estas preguntas, cada equipo seleccionado se analiza considerando sus funciones principales y secundarias, sus fallas funcionales, los modos de falla asociados a sus subsistemas, sus causas probables, los efectos observables y las consecuencias sobre la operación del riego. Las tareas propuestas pueden corresponder a inspecciones, limpieza, calibración, revisión de válvulas, control de presiones, monitoreo de caudales, verificación de sensores, ajustes operacionales, me-

jora de información o acciones por defecto cuando no exista una tarea preventiva técnicamente adecuada.

De esta manera, la aplicación de la metodología RCM transforma la evidencia obtenida en la Fase 0 en un análisis estructurado de confiabilidad. Mientras la Fase 0 identifica dónde se concentran las desviaciones relevantes o las recurrencias de intervención, las siete preguntas del RCM permiten analizar cómo podrían manifestarse las pérdidas de función, qué causas probables podrían explicarlas, qué consecuencias generan y qué acciones de mantenimiento resultan más pertinentes para sostener la función operacional del sistema de riego.

## 8. Resultados

### 8.1. Resultados de la Fase 0: diagnóstico y priorización

#### 8.1.1. Caracterización general del diagnóstico operacional

La base operacional sector-día consolidada para el campo El Huaico reunió 9.400 observaciones, correspondientes a los diez equipos de riego del campo, distribuidas en 31 semanas ISO durante el período comprendido entre octubre de 2025 y abril de 2026. De estas observaciones, 5.275 presentaron riego real registrado en Agronic, conjunto sobre el cual se evaluó el comportamiento hidráulico del sistema.

Cada observación se clasificó según su tipo de señal operacional, lo que permite caracterizar la naturaleza de las desviaciones detectadas a nivel de campo. La Tabla 7 resume esta distribución. La mayor parte de los registros corresponde a desviaciones de cumplimiento del programa de riego, seguida de registros sin señal operacional relevante. Entre las señales hidráulicamente interpretables, la desviación de solo precipitación es la más frecuente, mientras que los patrones coherentes de caudal-precipitación y las desviaciones de solo caudal constituyen subconjuntos más acotados.

Tabla 7: Distribución de señales operacionales en el campo El Huaico.

| Tipo de señal operacional               | Sector-día |
|-----------------------------------------|------------|
| Desviación de cumplimiento del programa | 4.264      |
| Sin señal operacional relevante         | 2.288      |
| Desviación solo de precipitación        | 1.926      |
| Patrón caudal-precipitación coherente   | 544        |
| Desviación solo de caudal               | 351        |
| Antecedente de fuga de contador         | 27         |

Fuente: Elaboración propia.

Destaca el peso de la desviación de solo precipitación, que supera a los demás focos hidráulicos. Una parte importante de estas señales no corresponde a un exceso real de aplicación de

agua, sino a diferencias entre la precipitación operacional registrada y la precipitación de referencia del Maestro de Riego. Este comportamiento constituye un hallazgo transversal del estudio, que se retoma en la Sección 10.3.

### 8.1.2. Ranking operacional de equipos

A partir de la agregación semanal del diagnóstico sector-día se construyó el ranking operacional de equipos, presentado en la Tabla 8. Este ranking ordena los equipos según el puntaje recurrente operacional acumulado durante el período, integrando el puntaje operacional de cada sector-día con la recurrencia semanal de los distintos patrones: coherente, solo caudal, solo precipitación, contradicción, fuga de contador e incumplimiento del programa.

Tabla 8: Ranking operacional de equipos del campo El Huaico.

| Rank | Equipo | $P_{rec,op}$ | Sem. coh. | Sem. solo Q | Sem. solo prec. | Sem. fuga | Sem. incump. |
|------|--------|--------------|-----------|-------------|-----------------|-----------|--------------|
| 1    | 4      | 4.444        | 21        | 26          | 24              | 11        | 29           |
| 2    | 7      | 4.118        | 12        | 4           | 29              | 7         | 29           |
| 3    | 8      | 4.080        | 12        | 8           | 25              | 5         | 29           |
| 4    | 10     | 3.880        | 14        | 18          | 26              | 8         | 29           |
| 5    | 6      | 3.855        | 6         | 0           | 22              | 3         | 28           |
| 6    | 9      | 3.621        | 14        | 6           | 26              | 9         | 28           |
| 7    | 5      | 2.915        | 26        | 11          | 24              | 8         | 29           |
| 8    | 2      | 2.389        | 21        | 5           | 6               | 8         | 27           |
| 9    | 1      | 1.397        | 7         | 5           | 0               | 3         | 21           |
| 10   | 3      | 1.053        | 6         | 6           | 24              | 10        | 29           |

Fuente: Elaboración propia.  $P_{rec,op}$ : puntaje recurrente operacional. Ningún equipo presentó semanas con contradicción caudal-precipitación, por lo que esa columna se omite de la tabla.

El Equipo 4 encabeza el ranking con un puntaje recurrente de 4.444, seguido por los Equipos 7, con 4.118 puntos, y 8, con 4.080 puntos. El Equipo 4 se distingue del resto por combinar la mayor recurrencia de semanas con patrón coherente y con desviación de solo caudal, es decir, las señales de mayor peso en el puntaje. Los equipos que le siguen comparten una alta recurrencia de desviación de solo precipitación, de menor peso porque su interpretación depende en mayor

medida de la referencia operacional utilizada. Ningún equipo del campo presentó semanas con contradicción entre caudal y precipitación, es decir, casos en que ambas variables se desviaran en sentidos opuestos.

### 8.1.3. Ranking complementario de eventos operacionales de terreno

De forma independiente al ranking operacional, se construyó un ranking complementario a partir de los eventos operacionales de terreno registrados en BaumSystem durante el período. Mientras el ranking operacional mide señales de desempeño a partir de los registros continuos de Agronic, este ranking complementario mide la recurrencia de eventos e intervenciones levantadas en terreno, por lo que constituye una capa de evidencia de naturaleza distinta.

Se procesaron 57 eventos, de los cuales 38 fueron de prioridad urgente, 17 de prioridad media y 2 de prioridad baja. Según su categoría, 39 correspondieron a eventos hidráulicos, 10 a señales o telemetría y 8 a centro de control o eléctricos. Del total, 38 eventos pudieron asignarse a un equipo específico, mientras que 19 correspondieron a infraestructura compartida o no admitieron una asignación unívoca, por lo que se mantuvieron separados para evitar atribuciones incorrectas.

Tabla 9: Ranking complementario de eventos operacionales de terreno por equipo.

| Rank | Equipo | N. eventos | Puntaje eventos |
|------|--------|------------|-----------------|
| 1    | 2      | 11         | 27              |
| 2    | 4      | 11         | 25              |
| 3    | 10     | 5          | 14              |
| 4    | 8      | 5          | 13              |
| 5    | 3      | 2          | 6               |
| 6    | 9      | 2          | 5               |
| 7    | 5      | 1          | 3               |
| 8    | 6      | 1          | 2               |

Fuente: Elaboración propia.

El ranking complementario sitúa en las primeras posiciones a los Equipos 2 y 4, ambos con 11 eventos. Al contrastar este ranking con el operacional, la correlación de Spearman entre los

puntajes de ambas capas alcanza un valor de  $\rho \approx 0,04$ , calculado sobre  $n = 10$  equipos. Este valor agregado, sin embargo, no permite por sí solo concluir que ambas capas sean independientes. La relación entre ellas se examina con mayor resolución a nivel sector-día en la sección siguiente.

#### 8.1.4. Asociación entre eventos de terreno y patrones operacionales

La correlación de Spearman presentada más arriba compara dos rankings agregados a nivel de equipo, con  $n = 10$ , por lo que solo admite una lectura descriptiva. Para examinar la relación con mayor resolución, se contrasta la asociación entre patrones operacionales y eventos de terreno directamente a nivel sector-día ( $n = 5\,275$  sector-día evaluables en El Huaico), según el procedimiento descrito en la Sección 7.2.12. La Tabla 10 reporta la coincidencia en el mismo día del evento ( $\pm 0$  días), escala en la que la asociación es más nítida; el comportamiento al ampliar la ventana se describe a continuación.

Tabla 10: Asociación entre eventos de terreno y patrones operacionales a nivel sector-día en El Huaico, considerando coincidencia en el mismo día del evento.

| Patrón operacional           | Prevalencia cerca del evento | $p$ (FDR) | Interpretación     |
|------------------------------|------------------------------|-----------|--------------------|
| Patrón coherente             | +185 %                       | 0,009     | Sobre-representado |
| Patrón de solo caudal        | +238 %                       | 0,009     | Sobre-representado |
| Patrón de solo precipitación | -36 %                        | 0,009     | Sub-representado   |

Fuente: Elaboración propia. La columna indica cuánto se aparta la prevalencia del patrón en los sector-día próximos a un evento respecto de su prevalencia basal en el campo (0 % = sin diferencia). Los valores  $p$  provienen de la prueba de  $\chi^2$ /Fisher de independencia entre patrón y evento, corregidos por Benjamini-Hochberg.

Los resultados muestran que la baja asociación observada a nivel agregado no implica ausencia de relación entre ambas capas. En el mismo día del evento, los patrones coherente y de solo caudal se encuentran sobre-representados cerca de los eventos de terreno: el patrón coherente es un 185 % más frecuente que su nivel basal y el patrón de solo caudal un 238 % más frecuente,

ambos con  $p = 0,009$  tras la corrección FDR.

En contraste, el patrón de solo precipitación, que corresponde al patrón hidráulico más frecuente del campo, aparece sub-representado cerca de los eventos: su frecuencia disminuye cerca de un 36 % respecto de su nivel basal, también con  $p = 0,009$ . Esto indica que los eventos de terreno tienden a coincidir con señales operacionales más directamente asociadas al caudal o a la consistencia caudal-precipitación, mientras que las desviaciones de solo precipitación tienden a no dejar un evento registrado.

El comportamiento temporal refuerza esta distinción. La sobre-representación del patrón coherente es más clara en el mismo día del evento y se diluye al ampliar la ventana, hasta quedar en torno a un 14 % por sobre el nivel basal en  $\pm 7$  días, diferencia que ya no es estadísticamente significativa. Esto es consistente con una señal hidráulica concurrente al evento más que anticipatoria.

El patrón de solo caudal, en cambio, mantiene una asociación significativa en todas las ventanas evaluadas, del orden de un 158 % por sobre el nivel basal en  $\pm 7$  días ( $p < 0,001$ ). La sub-representación del patrón de solo precipitación también persiste, cerca de un 36 % por debajo del nivel basal en  $\pm 7$  días ( $p < 0,001$ ).

Este resultado es coherente con la naturaleza de cada patrón. El patrón de solo precipitación se comporta como una señal mayormente informacional, asociada a referencias de precipitación no representativas o a diferencias entre la operación registrada y el dato maestro. Por ello, no necesariamente motiva una intervención física ni queda registrado como evento de terreno. En cambio, los patrones coherente y de solo caudal son más compatibles con condiciones hidráulicas u operacionales detectables en terreno, por lo que presentan mayor coincidencia con eventos registrados.

La cobertura del registro es parcial: el 93,2 % de los sector-día con señal coherente o de

solo caudal no tuvo ningún evento de terreno asociado dentro de la ventana de  $\pm 7$  días. Esto indica que la capa de eventos, aunque consistente en su dirección, está incompleta, lo que puede atribuirse al subregistro o a la fricción de registro en BaumSystem.

Esta lectura precisa la relación entre ambas capas y fundamenta el uso de dos rutas de selección. El ranking complementario captura eventos e intervenciones registradas en terreno, mientras que el ranking operacional captura también desviaciones que no necesariamente generan evento, especialmente aquellas asociadas a información o referencias de evaluación. Como ninguna de las dos capas cubre por sí sola ambos tipos de problema, su uso combinado permite seleccionar equipos que de otro modo quedarían fuera del análisis.

#### 8.1.5. Priorización integrada y selección de equipos para análisis RCM

A partir de ambos rankings se seleccionaron cuatro equipos para el análisis RCM en profundidad. El criterio de selección consideró la representación de tipos de problema diferenciados, de modo que el análisis abarcara situaciones de naturaleza distinta. La Tabla 11 resume la selección y la ruta de entrada de cada equipo.

Tabla 11: Equipos seleccionados para el análisis RCM y ruta de entrada.

| Equipo | Pos. op. | Pos. ev. | Ruta de entrada y tipo de caso                                                                                                          |
|--------|----------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7      | 2        | —        | Ruta A: desviación de solo precipitación asociada a la referencia de precipitación. Caso de consistencia de la información operacional. |
| 4      | 1        | 2        | Ruta A + B: convergencia. Caso hidráulico de regulación de presión, respaldado por desempeño, presión y eventos.                        |
| 5      | 7        | 7        | Ruta A: patrón coherente. Caso de menor entrega hidráulica localizada en un sector.                                                     |
| 2      | 8        | 1        | Ruta B: recurrencia de fallas de componentes, sin degradación sostenida del desempeño agregado.                                         |

Fuente: Elaboración propia.

El **Equipo 7** fue seleccionado por la Ruta A, como caso de desviación de solo precipitación: se ubica en el segundo lugar del ranking operacional, con el caudal dentro de rango y la

precipitación desviada respecto de su referencia. Representa un caso de consistencia de la información operacional, ya que la señal que lo posiciona en el ranking no se explica inicialmente por una desviación general del caudal, sino por la referencia utilizada para evaluar la precipitación.

El **Equipo 4** fue seleccionado por convergencia de ambas rutas, al ubicarse primero en el ranking operacional y segundo en el ranking complementario de eventos. La coincidencia de evidencia operacional y de terreno sobre un mismo activo lo convierte en el caso de mayor respaldo del estudio. Su análisis permite evaluar una condición hidráulica asociada a regulación de presión y control de caudal.

El **Equipo 5** fue seleccionado por la Ruta A, como caso de patrón coherente caudal-precipitación, en el que ambas variables se desvían en el mismo sentido y de forma localizada. Representa un caso de menor entrega hidráulica en un sector específico, por lo que permite analizar una desviación operacional compatible con pérdida de desempeño localizada.

El **Equipo 2** fue seleccionado por la Ruta B. Pese a su octava posición operacional, encabeza el ranking complementario de eventos, con fallas recurrentes distribuidas sobre múltiples válvulas. Su análisis se orienta a la confiabilidad de componentes y demuestra que un equipo puede requerir análisis RCM aun cuando su desempeño agregado no sea el más crítico del campo.

La selección por diversidad de casos implica seleccionar el Equipo 5, ubicado en la séptima posición operacional, por sobre equipos mejor situados como el Equipo 10, ya que representa un patrón coherente de desviación caudal-precipitación y permite incorporar un caso de menor entrega hidráulica localizada. El Equipo 10 corresponde, al igual que el Equipo 7, a un caso con alta recurrencia de desviación de solo precipitación, por lo que su incorporación habría duplicado un mismo tipo de problema. El Equipo 5, en cambio, aporta el caso más claro de menor entrega hidráulica coherente entre los equipos disponibles. El predominio de casos de solo precipitación

entre los equipos mejor ubicados constituye en sí mismo un hallazgo del campo, que se retoma en la Sección 10.3.

## 8.2. Funciones del equipo de riego y estándares de desempeño

Antes de analizar cada equipo, se define el conjunto común de funciones que todo equipo de riego debe cumplir en su contexto operacional, junto con su estándar de desempeño y la evidencia con que se evalúa cada una. Los cuatro equipos seleccionados se analizan contra este mismo marco, de modo que el diagnóstico RCM no redefine las funciones caso a caso, sino que determina, para cada equipo, el estado de cada función a partir de una fuente de datos definida. Esto mantiene el análisis comparable entre equipos y ancla cada conclusión a una medición y no a una apreciación.

Tabla 12: Catálogo de funciones del equipo de riego, estándar de desempeño y evidencia de evaluación.

| Función                                 | Estándar de desempeño                                                                                                 | Evidencia con que se evalúa                                                                          |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| F1: Aplicación hidráulica               | Aplicar agua manteniendo caudal y precipitación dentro del rango operacional definido ( $\pm 10\%$ de la referencia). | Desviación de caudal y de precipitación de la Fase 0.                                                |
| F2: Uniformidad de aplicación           | Distribuir el agua con la uniformidad de diseño del sistema.                                                          | Coefficiente de uniformidad y uniformidad de distribución medidos en terreno.                        |
| F3: Control de presión                  | Mantener la presión dentro del rango requerido por los emisores y la red.                                             | Mediciones de presión de cola y cabezal.                                                             |
| F4: Apertura y cierre de sectores       | Abrir y cerrar cada sector de forma confiable según la programación.                                                  | Eventos de terreno sobre válvulas, solenoides y telemetría; cumplimiento del programa.               |
| F5: Contención del paso de agua         | Operar sin fugas ni paso de agua no asignado.                                                                         | Fugas de contador y eventos de rotura o fuga hidráulica.                                             |
| F6: Medición y referencia operacional   | Evaluar la operación contra una referencia de caudal y precipitación representativa de la condición real del sector.  | Contraste de aforos de emisor con el Maestro de Riego y de caudalímetros con flujómetro ultrasónico. |
| F7: Registro y trazabilidad operacional | Registrar eventos e intervenciones con trazabilidad suficiente para estimar recurrencias y frecuencias de falla.      | Disponibilidad y estructura del historial de intervenciones.                                         |

Fuente: Elaboración propia.

En los desgloses siguientes, cada equipo se interpreta a partir de este catálogo común. Las tablas reportan las funciones que presentan evidencia relevante para el caso, junto con aquellas

necesarias para descartar hipótesis alternativas. Para cada función reportada se indica su estado, utilizando un vocabulario común: falla funcional dominante, falla funcional activa, falla funcional probable, hipótesis complementaria o sin falla funcional activa. La función con estado dominante es la que define el tipo de caso del equipo.

### **8.3. Desglose RCM en Equipo 7**

#### **8.3.1. Antecedentes**

El Equipo 7 fue seleccionado mediante la Ruta A, al ubicarse en el segundo lugar del ranking operacional recurrente, con un valor de 4.118 puntos. Durante la temporada analizada no se registraron eventos de terreno asignados a este equipo. El sistema riega una superficie de cerezo, variedad Ivu 115, distribuida en cinco sectores. Para su evaluación se consideraron 1.060 registros a nivel sector-día, de los cuales 688 correspondieron a días con riego real.

El comportamiento operacional del equipo presenta una condición relevante: los cinco sectores mantienen el caudal dentro del rango esperado, con una diferencia relativa media cercana a 2 % respecto de la referencia. Sin embargo, la precipitación operacional calculada presenta una diferencia media cercana a 15 %. Esto indica que la señal que posiciona al Equipo 7 en el ranking no proviene de una desviación general del caudal, sino de la comparación entre la precipitación calculada y la precipitación usada como referencia.

En términos prácticos, el equipo registra un caudal consistente con lo esperado, pero la precipitación resultante se evalúa contra una referencia que no necesariamente representa la condición real de aplicación. Por este motivo, el análisis no se orienta inicialmente hacia una falla física del sistema de riego, sino hacia la validez de la referencia de precipitación utilizada para

diagnosticarlo.

Existen dos antecedentes de terreno que permiten precisar esta interpretación. Primero, los caudalímetros del campo fueron contrastados con un flujómetro ultrasónico, y el caudalímetro del Equipo 7 presentó la menor desviación del campo. Esto respalda la consistencia de la medición de caudal utilizada en el diagnóstico. Segundo, los aforos de emisor realizados en los cinco sectores del equipo muestran una precipitación cercana a 2,2 mm/h, mientras que el Maestro de Riego mantiene una referencia de 1,6 mm/h en los sectores cuya precipitación no fue validada mediante aforo.

Esta diferencia entre la precipitación estimada en terreno y la precipitación registrada en el Maestro de Riego constituye la principal hipótesis explicativa del caso. Bajo esta lectura, la desviación observada no necesariamente evidencia una falla hidráulica del equipo, sino una inconsistencia entre la referencia utilizada para evaluar el sistema y la condición medida en terreno.

### **8.3.2. Lectura sectorial del caso**

La lectura sectorial permite distinguir dos grupos dentro del Equipo 7. Los sectores 3 y 4 fueron evaluados con una referencia de precipitación validada mediante aforo, cercana a 2,2 mm/h, y no presentan desviaciones relevantes. En cambio, los sectores 1, 2 y 5 continúan siendo evaluados con la referencia del Maestro de Riego, equivalente a 1,6 mm/h, por lo que concentran la desviación de precipitación observada.

Tabla 13: Lectura sectorial del Equipo 7.

| Sector   | Señal principal                                                                                                                                                 | Interpretación                                                                       | Acción recomendada                                      |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Sector 1 | Caudal en rango, con diferencia media de 2 %; precipitación desviada, con diferencia media de 21 %. Referencia: 1,6 mm/h del Maestro; aforo: 2,25 mm/h.         | La desviación se asocia a la referencia y no a la entrega de agua.                   | Actualizar la referencia del Maestro al valor de aforo. |
| Sector 2 | Caudal en rango, con diferencia media de 6 %; precipitación desviada, con diferencia media de 47 %. Referencia: 1,6 mm/h del Maestro; aforo: 2,19 mm/h.         | Presenta la mayor brecha del equipo entre referencia del Maestro y aforo de terreno. | Actualizar la referencia del Maestro al valor de aforo. |
| Sector 3 | Caudal y precipitación en rango, con diferencias medias de -3 y -5 %. Referencia validada por aforo: 2,21 mm/h.                                                 | Con la referencia validada por aforo, la operación es consistente.                   | Mantener como condición de control.                     |
| Sector 4 | Caudal y precipitación en rango, con diferencias medias de 3 % y cercana a cero. Referencia validada por aforo: 2,22 mm/h.                                      | La operación es consistente con la referencia validada.                              | Mantener como condición de control.                     |
| Sector 5 | Caudal en rango, con diferencia media cercana a cero; precipitación desviada, con diferencia media de 11 %. Referencia: 1,6 mm/h del Maestro; aforo: 2,17 mm/h. | Repite el patrón asociado a la referencia.                                           | Actualizar la referencia del Maestro al valor de aforo. |

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de la Fase 0, aforos de emisor, mediciones de presión de cola y contraste de caudalímetros con flujómetro ultrasónico.

La tabla muestra que la diferencia entre sectores no se explica por un comportamiento hidráulico distinto, sino por la referencia de precipitación utilizada en el diagnóstico. En los sectores 3 y 4, donde la referencia fue validada mediante aforo, la precipitación se mantiene dentro del rango esperado. En cambio, los sectores 1, 2 y 5 concentran la desviación porque siguen siendo comparados contra una referencia del Maestro de Riego inferior a la precipitación estimada en terreno.

### 8.3.3. Funciones y fallas funcionales

El análisis RCM se estructura a partir de las funciones que debe cumplir el equipo. En este caso, la revisión muestra que las funciones asociadas a aplicación hidráulica, uniformidad y presión no presentan evidencia de falla funcional activa. La desviación dominante se relaciona con

la función de medición y referencia operacional, específicamente con la capacidad del sistema de evaluar la operación contra una precipitación representativa de la condición real del sector.

Tabla 14: Estado de las funciones del Equipo 7 frente al catálogo común.

| Función                               | Estado                     | Diagnóstico y evidencia                                                                                                                 |
|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| F6: Medición y referencia operacional | Falla funcional dominante  | La referencia de precipitación del Maestro (1,6 mm/h) no representa el aforo de terreno ( $\approx 2,2$ mm/h) en los sectores 1, 2 y 5. |
| F1: Aplicación hidráulica             | Sin falla funcional activa | El caudal se mantiene dentro de rango en los cinco sectores.                                                                            |
| F2: Uniformidad de aplicación         | Sin falla funcional activa | Uniformidad alta: coeficientes de uniformidad entre 93 % y 95 %, uniformidad de distribución entre 89 % y 93 %.                         |
| F3: Control de presión                | Sin falla funcional activa | Presión de cola dentro de rango, con media de 1,07 bar.                                                                                 |
| F4: Apertura y cierre de sectores     | Sin falla funcional activa | No se registran eventos de válvula ni de control asignados al equipo.                                                                   |
| F5: Contención del paso de agua       | Hipótesis complementaria   | Antecedente de fuga de contador en algunas semanas, de menor peso explicativo.                                                          |

Fuente: Elaboración propia. La medición de caudal no se considera modo de falla: el contraste con flujómetro ultrasónico mostró la menor desviación del campo.

La falla funcional dominante recae sobre la función F6, específicamente en la referencia utilizada para evaluar la precipitación. Esta distinción evita clasificar el caso como una falla física del equipo cuando la evidencia disponible apunta principalmente a una inconsistencia en el dato maestro. Además, el contraste con flujómetro ultrasónico respalda la consistencia de la medición de caudal, por lo que el caudalímetro no se considera un modo de falla probable en este caso.

#### 8.3.4. Modos de falla probables

A partir de la evidencia disponible, se identifican dos modos de falla probables. El primero corresponde al modo dominante del caso y se relaciona con la función de medición y referencia operacional. El segundo corresponde a una hipótesis complementaria asociada a posibles pérdidas o paso de agua no asignado, pero con menor capacidad explicativa respecto del patrón observado.

**Modo de falla 1: evaluación de precipitación con una referencia no representativa de la condición real.**

Es el modo dominante del caso, asociado a la función de medición y referencia operacional.

Se manifiesta como una desviación de precipitación en los sectores 1, 2 y 5, mientras el caudal se mantiene dentro de rango. Su causa probable es una referencia de precipitación del Maestro de Riego no representativa: los aforos de emisor indican una precipitación cercana a 2,2 mm/h, mientras el Maestro mantiene una referencia de 1,6 mm/h en esos sectores. La comparación con los sectores 3 y 4, cuya referencia fue validada por aforo y no presentan desviación, confirma que el origen principal está en la referencia de evaluación y no en una entrega anómala de agua.

#### **Modo de falla 2: paso de agua no asignado, registrado como fuga de contador.**

Se manifiesta como un antecedente de fuga de contador en algunas semanas. Su causa probable es una válvula con cierre deficiente o una fuga en la red asociada. Esta hipótesis se mantiene como complementaria, ya que no explica por sí sola el patrón principal del equipo: la desviación de precipitación se concentra en los sectores evaluados con la referencia del Maestro, mientras que los sectores con referencia validada no presentan la misma señal.

La medición de caudal mediante el caudalímetro no se considera un modo de falla probable, dado que el contraste con flujómetro ultrasónico mostró la menor desviación del campo y el caudal se mantuvo dentro de rango en los cinco sectores.

#### **8.3.5. Efectos, consecuencias y tareas recomendadas**

La consecuencia principal del caso es de tipo informacional. Si el equipo se evalúa con una referencia de precipitación que no representa su condición real, el diagnóstico puede sobredimensionar la criticidad operacional del activo y priorizar una intervención física que no corresponde. Por ello, la tarea recomendada se orienta primero a corregir la referencia de información y luego a recalcular el diagnóstico.

Tabla 15: Efectos, consecuencias y tareas recomendadas para el Equipo 7.

| Modo de falla probable                                                                                                                                                           | Efecto y consecuencia                                                                                                                                                                                                       | Tipo de tarea                                                     | Acción recomendada                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Evaluación de precipitación con una referencia no representativa de la condición real. <i>Causa probable:</i> referencia de precipitación del Maestro de Riego no representativa | Desviación de precipitación con caudal dentro de rango. La consecuencia es informacional alta, ya que el equipo puede ser priorizado por una desviación originada en la referencia de evaluación y no por una falla física. | Búsqueda de falla y corrección de referencia sobre la función F6. | Actualizar la referencia de precipitación del Maestro de Riego en los sectores 1, 2 y 5 utilizando los aforos disponibles. Luego, recalculer el diagnóstico operacional del equipo.                                          |
| Paso de agua no asignado, registrado como fuga de contador. <i>Causa probable:</i> válvula con cierre deficiente o fuga en la red asociada                                       | Antecedente de fuga de contador en algunas semanas. La consecuencia es económica e informacional media si se confirma en terreno.                                                                                           | Tarea a condición sobre la función F5.                            | Realizar inspección dirigida de válvulas, contador y red asociada, utilizando como antecedente las semanas con señal de fuga. Si corresponde, reparar o sustituir la válvula y verificar la correspondencia contador-sector. |

Fuente: Elaboración propia. Las consecuencias se evalúan según la escala cualitativa ordinal definida para el análisis.

### 8.3.6. Hallazgos principales del Equipo 7

El caso del Equipo 7 permite diferenciar una falla del activo de una inconsistencia en la información utilizada para evaluarlo. Aunque el equipo se ubica entre los primeros del ranking operacional recurrente, la evidencia disponible no respalda inicialmente la existencia de una falla física dominante. El caudal se mantiene dentro del rango esperado en los cinco sectores, el caudalímetro presenta una alta consistencia relativa según el contraste con flujómetro ultrasónico, la presión de cola se encuentra dentro de rango y la uniformidad de aplicación es alta.

La señal que posiciona al equipo en el ranking se explica principalmente por la comparación contra una referencia de precipitación del Maestro de Riego que resulta inferior a la precipitación estimada mediante aforos de emisor. Este patrón se observa en los sectores 1, 2 y 5, mientras que los sectores 3 y 4, evaluados con una referencia validada por aforo, no presentan desviación relevante.

Por lo tanto, la acción principal recomendada no corresponde a una reparación física del equipo, sino a la actualización de la referencia de precipitación del Maestro de Riego en los sectores 1, 2 y 5. Una vez realizada esta corrección, se debe recalculer el diagnóstico operacional del Equipo

7, ya que parte de su puntaje proviene de la comparación contra una referencia no representativa.

Este caso evidencia la importancia de incorporar una etapa de validación de referencias antes de transformar una desviación operacional en una falla física. En términos metodológicos, el Equipo 7 funciona como un caso de control para la Fase 0, ya que demuestra que la priorización no solo permite identificar activos con posible deterioro, sino también detectar inconsistencias de información que pueden afectar la interpretación del desempeño operacional.

## **8.4. Desglose RCM en Equipo 4**

### **8.4.1. Antecedentes**

El Equipo 4 fue seleccionado por convergencia de las dos rutas de priorización: ocupa la primera posición del ranking operacional, con un puntaje recurrente de 4.444, y la segunda posición del ranking complementario de eventos, con 11 eventos registrados. La coincidencia de ambas capas de evidencia sobre un mismo activo le otorga el mayor respaldo del estudio.

El equipo riega una superficie mixta de nectarín, variedad Garcica, y cerezo, variedad Lapins, distribuida en cuatro sectores. Se analizaron 848 registros sector-día, de los cuales 518 presentaron riego real. Su señal operacional dominante no proviene de la precipitación a nivel agregado, sino del caudal. La precipitación media del equipo se mantiene cercana al umbral inferior, con una desviación media cercana a -10 %, aunque el sector 4 presenta una precipitación baja que se analiza como hipótesis localizada. La desviación de solo caudal es el foco dominante, con una desviación media de caudal de 4 % y sobrecaudal concentrado en los sectores 2 y 3, con diferencias medias de 18 % y 10 %, respectivamente. El equipo se interpreta, por tanto, como un caso hidráulico asociado al control de presión y caudal.

El caso se sustenta en tres fuentes de evidencia. La primera es el desempeño operacional, con sobrecaudal recurrente. La segunda corresponde a las mediciones de presión de cola, que registran la mayor presión del grupo analizado, con una media de 1,74 bar y valores de hasta 3,06 bar. La tercera corresponde a los eventos de terreno, compuestos por 5 eventos urgentes, 4 medios y 2 bajos; de ellos, 5 son hidráulicos, 5 corresponden a señales o telemetría, y 1 a control. La distribución de eventos sobre múltiples válvulas del equipo es coherente con una condición de regulación general y no con la falla de un componente aislado.

#### 8.4.2. Lectura sectorial del caso

La presión y el sobrecaudal aparecen con distinta intensidad entre sectores y no siempre se corresponden. Por ello, el análisis no asume una relación mecánica directa entre ambas variables, sino que utiliza la presión como antecedente para orientar la inspección de regulación, válvulas y líneas sectoriales.

Tabla 16: Lectura sectorial del Equipo 4.

| Sector   | Señal principal                                                                                                                                                                               | Interpretación                                                                                                                                                                                                                                                      | Acción recomendada                                                           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Sector 1 | Caudal y precipitación dentro de rango, con diferencias medias de -4 % y -6 %. Presión de cola: 1,69 bar.                                                                                     | Operación sin señal hidráulica relevante. La presión se encuentra elevada respecto de otros equipos, pero no se traduce en una desviación operacional del sector.                                                                                                   | Mantener seguimiento operacional estándar.                                   |
| Sector 2 | Sobrecaudal de 18 %, con precipitación dentro de rango. Presión de cola: 1,68 bar.                                                                                                            | Corresponde al mayor sobrecaudal del equipo. La señal es compatible con una condición de regulación o control de caudal que debe verificarse en terreno.                                                                                                            | Revisar regulación de presión, válvula y línea del sector.                   |
| Sector 3 | Sobrecaudal moderado de 10 %, con precipitación levemente baja. Presión de cola: 1,18 bar.                                                                                                    | Comportamiento hidráulico intermedio. La desviación de caudal existe, pero no se acompaña de un aumento equivalente de precipitación.                                                                                                                               | Controlar presión y regulación del sector.                                   |
| Sector 4 | Caudal levemente menor, dentro del rango de tolerancia, con diferencia media de -8 %, y precipitación baja, con diferencia media de -24 %. Presión de cola: 2,46 bar, la más alta del equipo. | La combinación de presión alta con menor precipitación sugiere que la causa no puede atribuirse solo a presión elevada. Puede existir una restricción aguas abajo, una condición particular de la línea o una diferencia asociada a la referencia de precipitación. | Verificar regulador, posibles restricciones y estado de la línea del sector. |

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de la Fase 0, mediciones de presión de cola y eventos de terreno.

La condición de presión está presente en el equipo, pero su efecto sobre el caudal no es

homogéneo. El caudal elevado se concentra principalmente en los sectores 2 y 3, mientras que el sector 4, pese a tener la mayor presión de cola, presenta caudal levemente menor y precipitación baja, con diferencia media de -24 %. Por ello, el análisis orienta la inspección hacia presión y regulación, pero exige verificar el comportamiento sector por sector antes de definir una intervención.

### 8.4.3. Funciones y fallas funcionales

Tabla 17: Estado de las funciones del Equipo 4 frente al catálogo común.

| Función                               | Estado                              | Diagnóstico y evidencia                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| F3: Control de presión                | Falla funcional dominante           | Mayor presión de cola del grupo analizado, con media de 1,74 bar y valores de hasta 3,06 bar.                                                                                             |
| F1: Aplicación hidráulica             | Falla funcional activa              | Sobrecaudal recurrente en los sectores 2 y 3 (18 % y 10 %).                                                                                                                               |
| F5: Contención del paso de agua       | Falla funcional probable            | Respaldada por eventos de rotura o fuga hidráulica y antecedente de fuga de contador.                                                                                                     |
| F4: Apertura y cierre de sectores     | Falla funcional probable            | Eventos de señales y telemetría asociados a la respuesta de válvulas.                                                                                                                     |
| F2: Uniformidad de aplicación         | Sin falla funcional activa          | Uniformidad en rango: coeficientes entre 93 % y 94 %, distribución entre 89 % y 92 %.                                                                                                     |
| F6: Medición y referencia operacional | Hipótesis complementaria localizada | La referencia operacional no es el foco dominante del equipo; sin embargo, la precipitación baja del sector 4 exige verificar la referencia antes de atribuirla a una restricción física. |

Fuente: Elaboración propia.

Las fallas funcionales activas del Equipo 4 recaen sobre el control de presión y la aplicación hidráulica, respaldadas por el desempeño operacional y los eventos de terreno. La función de contención se mantiene como falla funcional probable por la presencia de fugas y eventos hidráulicos. La función de uniformidad no presenta falla activa, mientras que la función de medición y referencia queda como hipótesis complementaria localizada para el sector 4. En conjunto, el caso sigue siendo principalmente hidráulico, pero incorpora una verificación de referencia antes de definir una intervención física en ese sector.

### 8.4.4. Modos de falla probables

**Modo de falla 1: presión de operación fuera de rango con sobrecaudal en los sectores 2 y 3.**

Es el modo de mayor respaldo del caso, por la convergencia de tres evidencias: sobrecaudal recurrente en los sectores 2 y 3, presión de cola elevada y eventos de terreno asociados a regulación. Su causa probable corresponde a un regulador o piloto de presión que no mantiene la presión dentro del rango de diseño. La distribución de eventos sobre múltiples válvulas es coherente con una condición de regulación general del equipo y no con la falla de un componente aislado.

**Modo de falla 2: paso de agua no asignado en la red de conducción.**

Se manifiesta como fuga de contador y antecedentes de rotura o fuga hidráulica. Su causa probable es una válvula que no cierra completamente o una fuga en matriz o submatriz. Afecta la función de contención y puede producir pérdida de agua o distorsión de los consumos registrados.

**Modo de falla 3: la válvula no ejecuta la apertura o el cierre comandados.**

Se manifiesta como un sector que no riega cuando corresponde o que riega fuera de programa, de forma intermitente. Su causa probable se asocia a la automatización: solenoides, cableado o señales de telemetría que no transmiten correctamente la orden de apertura o cierre. Por su carácter intermitente, afecta la función F4 de apertura y cierre de sectores y corresponde a una condición con componente oculto.

**Modo de falla 4: precipitación baja con presión alta y caudal levemente menor en el sector 4.**

El sector 4 presenta la mayor presión de cola del equipo, junto con precipitación baja, con diferencia media de -24 %, y caudal levemente menor, dentro del rango de tolerancia. Esta combinación sugiere una condición localizada que no puede explicarse solo por presión elevada. Su causa probable puede corresponder a una restricción aguas abajo, una condición particular de la línea o una diferencia asociada a la referencia de precipitación. Se mantiene como hipótesis localizada a verificar en terreno.

### 8.4.5. Efectos, consecuencias y tareas recomendadas

Tabla 18: Efectos, consecuencias y tareas recomendadas para el Equipo 4.

| Modo de falla probable                                                                                                                                                                                     | Efecto y consecuencia                                                                                                                                                                   | Tipo de tarea                          | Acción recomendada                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Presión de operación fuera de rango con sobrecaudal en los sectores 2 y 3. <i>Causa probable</i> : regulador o piloto que no mantiene la presión                                                           | Presión de cola elevada y sobrecaudal en sectores 2 y 3. La consecuencia es económica y operacional media a alta, por mayor esfuerzo hidráulico y posible consumo energético adicional. | Tarea a condición sobre la función F3. | Controlar presión de cola y cabezal. Inspeccionar reguladores y pilotos. Si se confirma la condición, reacondicionar o sustituir el regulador o piloto y documentar la presión objetivo de operación. |
| Paso de agua no asignado en la red. <i>Causa probable</i> : válvula que no cierra completamente o fuga                                                                                                     | Paso de agua no asignado o fuga de contador. La consecuencia es económica media a alta por pérdida de agua y distorsión del consumo registrado.                                         | Tarea a condición sobre la función F5. | Inspeccionar válvulas y red según alertas de fuga y eventos de terreno. Si se confirma, reparar o sustituir válvula y reparar matriz o submatriz según corresponda.                                   |
| La válvula no ejecuta la apertura o el cierre comandados. <i>Causa probable</i> : solenoide, cableado o telemetría                                                                                         | Sector que no riega cuando corresponde o que riega fuera de programa. La consecuencia es operacional media.                                                                             | Búsqueda de falla.                     | Realizar verificación periódica de solenoides, cableado y telemetría. Si se confirma, recambiar solenoide, revisar señal y validar la respuesta de apertura y cierre.                                 |
| Precipitación baja con presión alta y caudal levemente menor en el sector 4. <i>Causa probable</i> : restricción aguas abajo, condición de la línea o diferencia asociada a la referencia de precipitación | Presión alta con precipitación baja, con diferencia media de -24 %, en el sector 4. La consecuencia es operacional media si se confirma una menor entrega localizada.                   | Tarea a condición.                     | Inspeccionar la línea, regulador y posibles restricciones del sector 4. Verificar además la referencia de precipitación utilizada para el sector antes de definir una intervención física.            |

Fuente: Elaboración propia. Las consecuencias se evalúan según la escala cualitativa ordinal definida para el análisis.

### 8.4.6. Hallazgos principales del Equipo 4

El Equipo 4 es el caso de convergencia del estudio: el desempeño operacional, las mediciones de presión y los eventos de terreno coinciden sobre un diagnóstico asociado a regulación de presión y contención. A diferencia de los casos de solo precipitación, la señal dominante no corresponde a una inconsistencia general de referencia, sino a un comportamiento hidráulico respaldado por presión, caudal y eventos de terreno.

El modo de regulación de presión es el de mayor respaldo del estudio. Sin embargo, el análisis incorpora un matiz relevante para evitar sobrediagnóstico: la presión elevada no se traduce en sobrecaudal en todos los sectores, ya que el sector 4, con la presión más alta, presenta caudal levemente menor y precipitación baja, con diferencia media de -24 %. Por lo tanto, la respuesta

recomendada no es una intervención general inmediata, sino una secuencia diferenciada de revisión de regulación, contención, control de válvulas y verificación de referencia, revisando cada sector según su comportamiento operacional.

## **8.5. Desglose RCM en Equipo 5**

### **8.5.1. Antecedentes**

El Equipo 5 fue seleccionado por la Ruta A, como caso de patrón coherente caudal-precipitación, en el que ambas variables se desvían en el mismo sentido y en magnitud comparable. Este patrón se interpreta como una señal operacional compatible con una menor entrega hidráulica efectiva, ya que un cambio en la entrega de agua debiera reflejarse simultáneamente en el caudal registrado y en la precipitación operacional calculada.

El equipo riega una superficie de nectarín, variedades Boreal y Extreme 712, distribuida en cinco sectores. Se analizaron 1.060 registros sector-día, de los cuales 691 presentaron riego real. La coherencia se concentra de forma marcada en el sector 2: de los 124 registros sector-día coherentes del equipo, 94 corresponden a ese sector. El Equipo 5 no presenta, por tanto, una degradación generalizada, sino una condición acotada a un sector, mientras el resto opera dentro de rango.

### 8.5.2. Lectura sectorial del caso

Tabla 19: Lectura sectorial del Equipo 5.

| Sector   | Señal principal                                                                                                                         | Interpretación                                                                                                                                               | Acción recomendada                                                                                |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sector 1 | Caudal y precipitación dentro de rango, con diferencias medias de 0 % y -3 %.                                                           | Operación sin señal hidráulica relevante.                                                                                                                    | Mantener seguimiento operacional estándar.                                                        |
| Sector 2 | Menor entrega coherente y sostenida: caudal y precipitación con diferencias medias cercanas a -11 %. Concentra 94 registros coherentes. | Caudal y precipitación disminuyen juntos y en magnitud comparable. Esto constituye una señal operacional compatible con menor entrega hidráulica localizada. | Inspeccionar válvula, regulador y línea del sector. Verificar la fecha de inicio de la condición. |
| Sector 3 | Caudal y precipitación dentro de rango, con diferencias medias de 4 % y 7 %.                                                            | Operación sin señal hidráulica relevante.                                                                                                                    | Mantener seguimiento operacional estándar.                                                        |
| Sector 4 | Caudal y precipitación dentro de rango, con diferencias medias de 1 % y 2 %. Referencia validada por aforo.                             | Operación consistente con la referencia utilizada.                                                                                                           | Mantener como condición de control.                                                               |
| Sector 5 | Caudal dentro de rango y precipitación levemente baja, con diferencia media cercana a -11 %.                                            | Desviación menor, sin coherencia sostenida comparable a la observada en el sector 2.                                                                         | Mantener seguimiento operacional.                                                                 |

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de la Fase 0, aforos, uniformidad y mediciones de presión de cola.

El análisis temporal del sector 2 aporta el elemento decisivo del caso. La menor entrega no está presente durante toda la temporada: en octubre el sector opera en rango, con una desviación de caudal cercana a 1 %, y a partir de noviembre cae a valores en torno a -11 % a -14 %, manteniéndose en ese nivel el resto del período. La condición se instala en un momento determinado y persiste, lo que es compatible con una restricción o ajuste operacional que aparece durante la temporada. Este comportamiento se distingue de una desviación de referencia, que sería esperable de manera más constante durante todo el período.

### 8.5.3. Funciones y fallas funcionales

Tabla 20: Estado de las funciones del Equipo 5 frente al catálogo común.

| Función                               | Estado                     | Diagnóstico y evidencia                                                                                          |
|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| F1: Aplicación hidráulica             | Falla funcional dominante  | Menor entrega coherente y sostenida en el sector 2, con caudal y precipitación cercanos a -11 % desde noviembre. |
| F2: Uniformidad de aplicación         | Sin falla funcional activa | Uniformidad del sector 2 alta: coeficiente de 95 %, distribución de 93 %.                                        |
| F3: Control de presión                | Sin falla funcional activa | Presión de cola del sector 2 en rango, con media de 1,49 bar.                                                    |
| F5: Contención del paso de agua       | Hipótesis complementaria   | Antecedente de fuga de contador en algunas semanas.                                                              |
| F6: Medición y referencia operacional | Sin falla funcional activa | La coherencia caudal-precipitación indica menor entrega efectiva y no un problema de referencia.                 |

Fuente: Elaboración propia.

La falla funcional dominante recae sobre la aplicación hidráulica y se localiza en el sector 2. Las funciones de presión y uniformidad no presentan falla activa, lo que permite descartar como explicación principal una presión insuficiente o un deterioro disparejo de emisores. La coherencia entre caudal y precipitación indica que la señal corresponde a una entrega efectivamente menor, y no a una inconsistencia dominante de referencia.

### 8.5.4. Modos de falla probables

#### Modo de falla 1: menor entrega de agua coherente y sostenida en el sector 2.

Es el modo central del caso. Se manifiesta como una reducción conjunta de caudal y precipitación en el sector 2, cercana al 11 %, sostenida desde noviembre. Su causa probable es una restricción de la entrega del sector: una válvula sectorial que abre parcialmente, un regulador ajustado por debajo de lo requerido o una restricción en la línea de conducción. La coherencia y uniformidad de la reducción descartan como causa principal la obstrucción de emisores, que afectaría la uniformidad, y la presión insuficiente, que no se observa en las mediciones de cola. El carácter fechable de la condición es compatible con un evento puntual de ajuste, falla o instalación de la

restricción.

### **Modo de falla 2: paso de agua no asignado, registrado como fuga de contador.**

Se manifiesta como un antecedente de fuga de contador en algunas semanas. Su causa probable es una fuga en la red del sector o una válvula con cierre deficiente. Se mantiene como hipótesis complementaria de menor peso, a revisar junto con la inspección del sector 2.

Se descartan como modos de falla dominantes la pérdida de uniformidad por obstrucción o deterioro de emisores, dado que la uniformidad del sector 2 es alta, y la presión de operación insuficiente, dado que la presión de cola del sector se encuentra en rango y es comparable a la del resto del equipo.

### **8.5.5. Efectos, consecuencias y tareas recomendadas**

Tabla 21: Efectos, consecuencias y tareas recomendadas para el Equipo 5.

| Modo de falla probable                                                                                                                       | Efecto y consecuencia                                                                                                                                                                                                                                                         | Tipo de tarea                          | Acción recomendada                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Menor entrega de agua coherente y sostenida en el sector 2. <i>Causa probable:</i> restricción por válvula, regulador o línea                | Menor entrega coherente y sostenida desde noviembre, con caudal y precipitación cercanos a -11 %. La consecuencia es operacional media a alta, con posible impacto productivo, ya que el sector presenta una menor entrega sostenida durante parte relevante de la temporada. | Tarea a condición sobre la función F1. | Inspeccionar válvula sectorial, regulador y línea del sector 2. Verificar grado de apertura y ajuste. Si se confirma, reacondicionar o ajustar la válvula o regulador, eliminar la restricción y verificar la recuperación del caudal. |
| Paso de agua no asignado, registrado como fuga de contador. <i>Causa probable:</i> fuga en la red del sector o válvula con cierre deficiente | Antecedente de fuga de contador en algunas semanas. La consecuencia es económica e informacional media.                                                                                                                                                                       | Tarea a condición sobre la función F5. | Realizar inspección dirigida por la señal de fuga de contador. Si se confirma, reparar la fuga o corregir el cierre de la válvula y verificar la correspondencia contador-sector.                                                      |

Fuente: Elaboración propia. Las consecuencias se evalúan según la escala cualitativa ordinal definida para el análisis.

### **8.5.6. Hallazgos principales del Equipo 5**

El Equipo 5 corresponde a un caso de menor entrega hidráulica localizada. La coherencia entre caudal y precipitación indica que el sector 2 recibe menos agua que lo definido por su referencia operacional. El valor del caso reside en dos aspectos. El primero es la localización: la

condición se acota al sector 2, mientras el resto del equipo opera dentro de rango, lo que permite dirigir la intervención. El segundo es la datación: el análisis temporal sitúa el inicio de la menor entrega en noviembre, transformando una desviación promedio en una condición con un momento de aparición identificable.

La combinación de coherencia, uniformidad alta y presión normal permite orientar el diagnóstico hacia una restricción de la entrega por válvula, regulador o línea del sector. La consecuencia principal es operacional, con posible impacto productivo, dado que una menor entrega sostenida durante parte relevante de la temporada puede afectar la disponibilidad de agua del sector. La tarea recomendada es la inspección a condición del sector 2, dirigida por la evidencia operacional.

## **8.6. Desglose RCM en Equipo 2**

### **8.6.1. Antecedentes**

El Equipo 2 fue seleccionado por la Ruta B, asociada a la recurrencia de eventos e intervenciones correctivas. Ocupa la octava posición del ranking operacional, con un puntaje recurrente de 2.389, pero encabeza el ranking complementario de eventos, con 11 eventos asignados. Esta diferencia entre ambos rankings fundamenta la existencia de la Ruta B.

El equipo riega una superficie de cerezo, variedad Santina, distribuida en cinco sectores. Se analizaron 1.060 registros sector-día, de los cuales 650 presentaron riego real. Su desempeño operacional agregado se mantiene en rango, con desviaciones medias de precipitación y caudal cercanas a 1 % y -2 %, respectivamente. En términos agregados, el equipo riega de forma correcta, pero requiere intervenciones repetidas durante la temporada. Su inclusión responde, por tanto, a una pregunta distinta de la del desempeño: qué equipo requiere intervenciones repetitivas y podría

beneficiarse de una estrategia basada en la confiabilidad de sus componentes.

Los antecedentes complementarios acotan otras hipótesis. La uniformidad medida está en rango en la mayoría de los sectores, con coeficientes de uniformidad entre 91 % y 95 % y uniformidad de distribución entre 84 % y 93 %, con el sector 5 algo más bajo. La presión de cola se mantiene en rango, con media de 1,06 bar. Por ello, ni la uniformidad ni la presión explican el caso, que se interpreta como una recurrencia de fallas localizadas de componentes, principalmente válvulas, solenoides y elementos de control.

### 8.6.2. Lectura sectorial del caso

Tabla 22: Lectura sectorial del Equipo 2.

| Sector   | Señal principal                                                                                                         | Interpretación                                                                                        | Acción recomendada                                  |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Sector 1 | Operación dentro de rango, con diferencias medias de 1 % y 4 %. Uniformidad alta. Eventos de válvula.                   | No se observa una condición hidráulica agregada. La evidencia apunta a fallas localizadas de válvula. | Revisar válvulas y solenoide asociados.             |
| Sector 2 | Operación dentro de rango, con diferencias medias de -1 % y 4 %. Eventos de válvula y control.                          | Combina antecedentes de falla de válvula y automatización.                                            | Revisar válvulas, solenoides y señal de control.    |
| Sector 3 | Operación dentro de rango, con diferencias medias de 0 % y 3 %. Uniformidad en rango. Eventos de válvula.               | Falla localizada probable de válvula o cierre deficiente, sin degradación hidráulica agregada.        | Inspeccionar válvulas y cierre hidráulico.          |
| Sector 4 | Leve menor entrega, con diferencias medias de -7 % y -8 %. Uniformidad alta.                                            | Desviación menor, sin recurrencia marcada.                                                            | Mantener seguimiento operacional.                   |
| Sector 5 | Operación dentro de rango, con diferencias medias de -1 % y 2 %. Uniformidad más baja del equipo. Eventos de solenoide. | Recurrencia de fallas de válvula o control con efecto localizado.                                     | Revisar solenoide y respuesta de apertura y cierre. |

Fuente: Elaboración propia a partir de eventos de terreno, mediciones de presión de cola, uniformidad y antecedentes de la Fase 0.

La presión no explica el caso: la mayor parte de las mediciones está en rango, la uniformidad es adecuada y los eventos se distribuyen entre sectores y componentes distintos. El problema no corresponde a una condición hidráulica generalizada, sino a la recurrencia de fallas localizadas en válvulas, solenoides y elementos de control.

### 8.6.3. Funciones y fallas funcionales

Tabla 23: Estado de las funciones del Equipo 2 frente al catálogo común.

| Función                                 | Estado                         | Diagnóstico y evidencia                                                                                    |
|-----------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| F4: Apertura y cierre de sectores       | Falla funcional dominante      | Reurrencia de eventos sobre válvulas, solenoides y elementos de control, distribuida en varios sectores.   |
| F5: Contención del paso de agua         | Falla funcional probable       | Antecedente de fuga de contador y eventos de rotura o fuga hidráulica.                                     |
| F7: Registro y trazabilidad operacional | Falla funcional de información | El historial disponible no permite estimar tasas de falla ni intervalos preventivos con base estadística.  |
| F1: Aplicación hidráulica               | Sin falla funcional activa     | Desempeño agregado en rango (precipitación y caudal medios cercanos a 1 % y -2 %); condición de monitoreo. |
| F2: Uniformidad de aplicación           | Sin falla funcional activa     | Uniformidad en rango en la mayoría de los sectores (coeficientes entre 91 % y 95 %).                       |
| F3: Control de presión                  | Sin falla funcional activa     | Presión de cola en rango, con media de 1,06 bar.                                                           |

Fuente: Elaboración propia.

La falla funcional dominante no recae sobre la aplicación hidráulica, que está en rango, sino sobre la apertura y cierre confiable de sectores. Se incorpora además la contención del paso de agua como falla funcional probable y el registro y trazabilidad operacional como falla de información, condición que limita la estimación de frecuencias de falla.

### 8.6.4. Modos de falla probables

#### **Modo de falla 1: apertura o cierre deficiente de válvulas, de forma recurrente y localizada.**

Es el modo principal del caso. Se manifiesta como un sector que no riega, no cierra o queda pasando agua, con intervención correctiva repetida sobre válvulas distintas a lo largo de la temporada. Su causa probable es la ruptura, deterioro o desajuste recurrente de componentes de válvula. Como cada intervención es acotada, el efecto no modifica el desempeño agregado del equipo, lo que explica que no destaque en el ranking operacional pese a su recurrencia. La distribución de las fallas sobre válvulas distintas es la señal de confiabilidad más relevante del caso.

#### **Modo de falla 2: el sector no responde a la orden de apertura o cierre.**

Se manifiesta como un sector que no abre, no cierra o responde de forma intermitente. Su causa probable se asocia a solenoides, cableado o señal de control. En este caso, el problema no está necesariamente en la válvula como elemento hidráulico, sino en la orden que la acciona. Su efecto puede ser intermitente y no necesariamente reflejarse como una desviación hidráulica sostenida.

### **Modo de falla 3: paso de agua no asignado por cierre incompleto o fuga.**

Se manifiesta como fuga de contador y antecedentes de rotura o fuga hidráulica. Su causa probable es una válvula que no cierra completamente o una fuga en matriz o submatriz. Este modo afecta la función F5 de contención del paso de agua y puede generar pérdida de agua o distorsión de los consumos registrados.

#### **8.6.5. Efectos, consecuencias y tareas recomendadas**

Tabla 24: Efectos, consecuencias y tareas recomendadas para el Equipo 2.

| Modo de falla probable                                                                                                                                      | Efecto y consecuencia                                                                                                                                                                                | Tipo de tarea                                                        | Acción recomendada                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Apertura o cierre deficiente de válvulas, de forma recurrente y localizada. <i>Causa probable:</i> ruptura, deterioro o desajuste de componentes de válvula | Falla localizada de apertura, cierre o regulación, con intervención correctiva repetida. La consecuencia es operacional y económica media a alta, por interrupciones localizadas y costo recurrente. | Búsqueda de falla, inspección a condición y registro de recurrencia. | Inspeccionar válvulas con mayor recurrencia y analizar causa común. Si se confirma, planificar recambio de componentes recurrentes y estandarizar repuestos críticos.                         |
| El sector no responde a la orden de apertura o cierre. <i>Causa probable:</i> solenoide, cableado o señal de control                                        | Sector que no abre, no cierra o responde de forma intermitente. La consecuencia es operacional media.                                                                                                | Búsqueda de falla.                                                   | Realizar prueba funcional periódica de apertura y cierre; revisar solenoides, cableado y señal. Si se confirma, recambiar solenoide o reparar cableado, validando la respuesta de la válvula. |
| Paso de agua no asignado por cierre incompleto o fuga. <i>Causa probable:</i> válvula que no cierra o fuga                                                  | Paso de agua no asignado o fuga de contador. La consecuencia es económica y operacional media.                                                                                                       | Tarea a condición sobre la función F5.                               | Inspeccionar según señal de fuga de contador, revisar válvulas y matriz. Si se confirma, reparar válvula o matriz y verificar el cierre y la desaparición de la fuga.                         |

Fuente: Elaboración propia. Las consecuencias se evalúan según la escala cualitativa ordinal definida para el análisis.

**8.6.5.1. Nota sobre la trazabilidad.** La información disponible permite identificar la recurrencia de eventos durante la temporada, pero no estimar tasas de falla, tiempos medios entre fallas ni

costos por componente, al disponerse de una sola temporada de registros. Por ello, antes de definir intervalos preventivos cerrados, se recomienda implementar un registro de intervención por componente que incorpore fecha, sector, síntoma, acción ejecutada, repuesto utilizado y condición posterior.

#### **8.6.6. Hallazgos principales del Equipo 2**

El Equipo 2 muestra el valor de la segunda ruta de selección. Su relevancia no proviene de una pérdida de desempeño sostenida, sino de la recurrencia de eventos e intervenciones correctivas. Su desempeño operacional agregado se mantiene en rango, con uniformidad adecuada y sin inconsistencias de medición dominantes, lo que demuestra que un equipo puede requerir análisis aun cuando su desempeño agregado no sea de los más críticos del campo.

La interpretación principal corresponde a la recurrencia de fallas localizadas en válvulas, solenoides y elementos de control. La recomendación no es intervenir el equipo completo, sino estructurar el seguimiento de estas fallas, registrando cada intervención con mayor trazabilidad. Esto permitiría transitar desde una respuesta correctiva caso a caso hacia una gestión basada en la recurrencia observada.

#### **8.7. Selección de tareas mediante la lógica de decisión RCM**

Las tareas de mantenimiento recomendadas para cada equipo no se definieron de forma directa, sino aplicando la lógica de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Esta lógica establece que el tipo de tarea apropiado para un modo de falla depende, en primer lugar, de las consecuencias de esa falla, y solo después de su naturaleza técnica, de acuerdo con el enfoque propuesto por Moubray (1997). Antes de preguntar qué se puede hacer, el método exige preguntar

qué ocurre si la falla se produce y a quién o a qué afecta.

### 8.7.1. Clasificación de las consecuencias

El primer paso clasifica cada modo de falla según el tipo de consecuencia que genera. Esta clasificación determina la rama de decisión y, con ella, el tipo de tarea admisible. La Tabla 25 resume las categorías y su aplicación al sistema de riego.

Tabla 25: Tipología de consecuencias del RCM aplicada al sistema de riego.

| Tipo de consecuencia      | Aplicación al sistema de riego                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Oculto                    | La falla no es evidente para el operador en condiciones normales. Es el caso de la función de medición y referencia: una referencia de precipitación no representativa o un caudalímetro desviado no detienen el riego, por lo que la falla solo se descubre al analizarla. Requiere tareas de búsqueda de falla.                  |
| Operacional               | La falla afecta la capacidad del sistema de regar según lo requerido, con impacto sobre la continuidad, oportunidad o calidad de la aplicación. Es el caso de la menor entrega de un sector o de la regulación de presión. Admite tareas a condición o de sustitución programada, si son técnicamente factibles y costo-efectivas. |
| No operacional            | La falla solo implica el costo de su reparación, sin afectar la entrega de agua de forma relevante. Puede admitir, en ciertos casos, una estrategia de operar hasta la falla.                                                                                                                                                      |
| Seguridad o medioambiente | La falla puede afectar a las personas o al entorno. En el sistema analizado no se identificaron modos de esta categoría, pero se mantiene en la lógica por completitud metodológica.                                                                                                                                               |

Fuente: Elaboración propia con base en Moubray (1997).

### 8.7.2. Árbol de decisión de tareas

Una vez clasificada la consecuencia, la selección de la tarea sigue el árbol de decisión de la Figura 5. La lógica prioriza, en este orden, las tareas a condición, que permiten detectar una condición antes de que derive en falla funcional; las tareas de sustitución o reacondicionamiento programado, cuando existe un patrón de edad-falla conocido; y, para las funciones ocultas, las tareas de búsqueda de falla. Cuando ninguna tarea proactiva resulta técnicamente factible o costo-efectiva, el método recurre a una acción por defecto: rediseño, corrección de información o decisión explícita de operar hasta la falla.

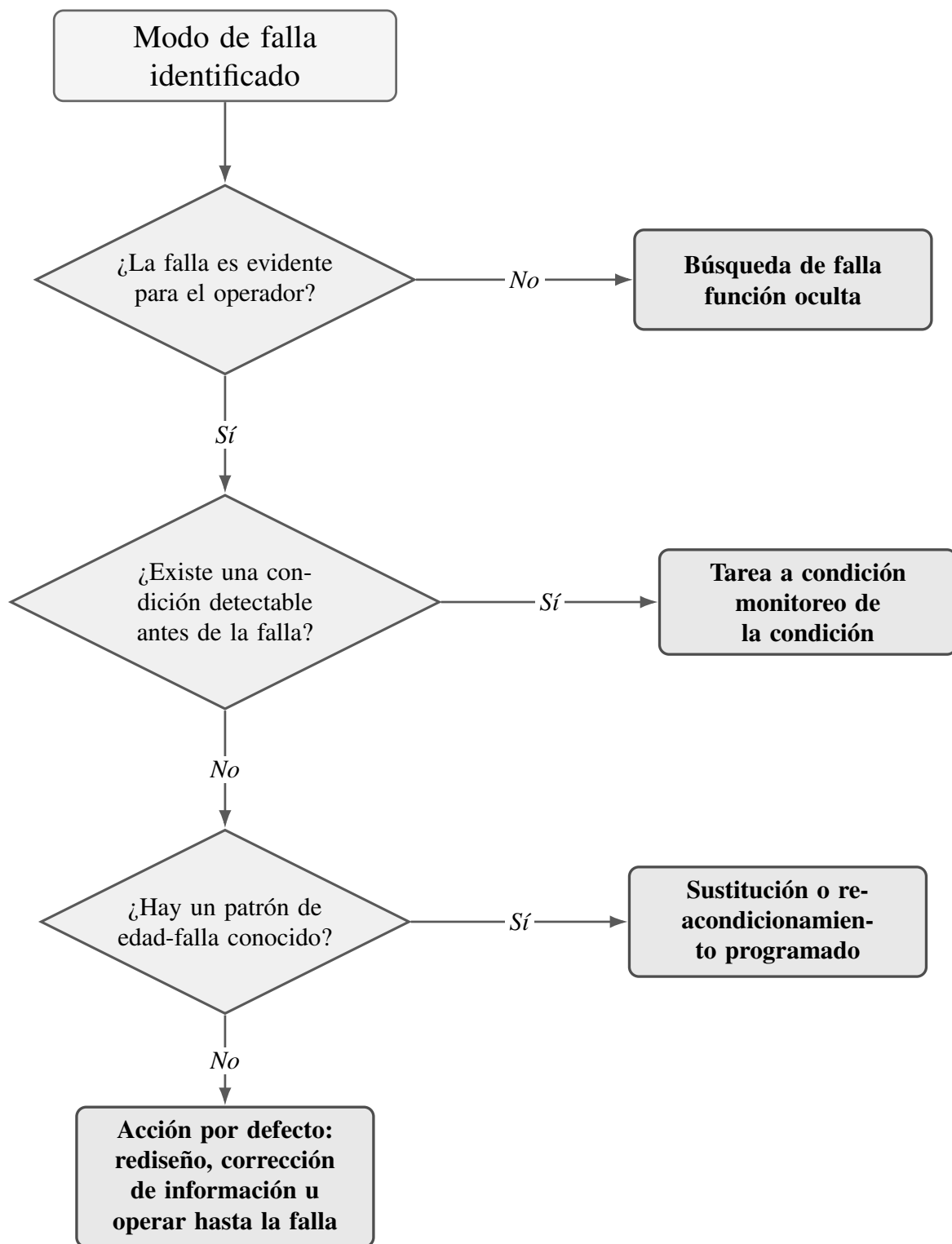


Figura 5: Árbol de decisión para la selección del tipo de tarea de mantenimiento. Elaboración propia con base en Moubray (1997).

La aplicación de este árbol explica las tareas asignadas en los desgloses por equipo. Por

ejemplo, la evaluación de precipitación con una referencia no representativa, al corresponder a una función de medición y referencia que no es evidente para el operador durante la ejecución normal del riego, deriva en una tarea de búsqueda de falla y en una acción de corrección de la información. En cambio, la regulación de presión del Equipo 4, al tener una condición detectable mediante mediciones de presión de cola y cabezal, admite una tarea a condición. La recurrencia de válvulas del Equipo 2, al no contar aún con un patrón de edad-falla establecido, deriva en búsqueda de falla, prueba funcional y registro estructurado de intervenciones, de modo que más adelante pueda evaluarse si corresponde una sustitución programada.

## **8.8. Plan consolidado de tareas de mantenimiento**

A partir de la lógica de decisión, las tareas recomendadas se consolidan en dos niveles. Primero, la Tabla 26 presenta las tareas asociadas a los modos de falla probables identificados en los equipos analizados. Luego, la Tabla 27 resume las tareas transversales que aplican al sistema completo. Esta separación permite mantener la lectura ordenada, evitando una tabla excesivamente extensa y facilitando la identificación de acciones, criterios de activación y responsables.

Tabla 26: Plan consolidado de tareas de mantenimiento por equipo.

| Equipo   | Modo de falla probable o condición                                                     | Tipo RCM e intervalo de activación                                                                                                                                   | Acción recomendada y responsable                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Equipo 7 | Evaluación de precipitación con una referencia no representativa de la condición real. | Consecuencia oculta. Búsqueda de falla y corrección de información. Contraste mensual con aforo durante la temporada y revisión de superficie una vez por temporada. | Actualizar la referencia de precipitación del Maestro de Riego en los sectores 1, 2 y 5 si se confirma la inconsistencia. Luego, recalcular el diagnóstico operacional. Responsable: Gerencia de Operaciones, con antecedentes de aforo y superficie entregados por jefes de riego. |
| Equipo 7 | Paso de agua no asignado, registrado como fuga de contador.                            | Consecuencia operacional. Tarea a condición. Se activa ante alerta de fuga de contador.                                                                              | Inspeccionar contador, válvula y red asociada. Si corresponde, reparar fuga o corregir cierre de válvula. Responsable: Gerencia de Operaciones, en coordinación con jefes de riego.                                                                                                 |
| Equipo 4 | Presión de operación fuera de rango con sobrecaudal en los sectores 2 y 3.             | Consecuencia operacional. Tarea a condición. Control mensual de presión de cola y cabezal durante la temporada.                                                      | Revisar presión de cola, cabezal, reguladores y pilotos. Si se confirma la condición, reacondicionar o sustituir el regulador o piloto y documentar la presión objetivo de operación. Responsable: Gerencia de Operaciones, en coordinación con jefes de riego.                     |
| Equipo 4 | Paso de agua no asignado en la red de conducción.                                      | Consecuencia operacional. Tarea a condición. Se activa ante alerta de fuga de contador o evento de terreno.                                                          | Inspeccionar válvulas, matriz y submatriz asociada. Si se confirma, reparar fuga, matriz, submatriz o corregir cierre de válvula. Responsable: Gerencia de Operaciones, en coordinación con jefes de riego.                                                                         |
| Equipo 4 | La válvula no ejecuta la apertura o el cierre comandados.                              | Consecuencia oculta u operacional según manifestación. Búsqueda de falla. Prueba funcional mensual durante la temporada.                                             | Verificar apertura, cierre, señal, cableado, telemetría y respuesta de solenoides. Responsable: Gerencia de Operaciones, en coordinación con jefes de riego.                                                                                                                        |
| Equipo 4 | Precipitación baja con presión alta y caudal levemente menor en el sector 4.           | Consecuencia operacional. Tarea a condición. Se activa ante persistencia de precipitación baja, caudal fuera de rango o presión fuera de rango.                      | Inspeccionar regulador, línea y posibles restricciones aguas abajo del sector 4. Verificar además la referencia de precipitación del sector antes de definir una intervención física. Responsable: Gerencia de Operaciones, en coordinación con jefes de riego.                     |
| Equipo 5 | Menor entrega de agua coherente y sostenida en el sector 2.                            | Consecuencia operacional. Tarea a condición. Se activa ante caída sostenida de caudal o señal coherente de menor entrega.                                            | Inspeccionar válvula sectorial, regulador y línea del sector 2. Verificar grado de apertura y ajuste. Si se confirma, corregir la restricción y verificar recuperación del caudal. Responsable: Gerencia de Operaciones, en coordinación con jefes de riego.                        |
| Equipo 5 | Paso de agua no asignado, registrado como fuga de contador.                            | Consecuencia operacional e informacional. Tarea a condición. Se activa ante señal de fuga de contador.                                                               | Realizar inspección dirigida por la señal de fuga. Si se confirma, reparar fuga o corregir cierre de válvula y verificar correspondencia contador-sector. Responsable: Gerencia de Operaciones, en coordinación con jefes de riego.                                                 |
| Equipo 2 | Apertura o cierre deficiente de válvulas, de forma recurrente y localizada.            | Consecuencia operacional. Búsqueda de falla, inspección a condición y registro de recurrencia. Prueba funcional mensual y análisis al cierre de temporada.           | Inspeccionar válvulas con mayor recurrencia, analizar causa común, registrar intervención por componente y evaluar recambio de componentes recurrentes. Responsable: Gerencia de Operaciones, en coordinación con jefes de riego.                                                   |
| Equipo 2 | El sector no responde a la orden de apertura o cierre.                                 | Consecuencia oculta u operacional según manifestación. Búsqueda de falla. Prueba funcional mensual durante la temporada.                                             | Revisar solenoides, cableado, señal de control y respuesta de apertura y cierre. Si se confirma, reemplazar solenoide o reparar cableado. Responsable: Gerencia de Operaciones, en coordinación con jefes de riego.                                                                 |
| Equipo 2 | Paso de agua no asignado por cierre incompleto o fuga.                                 | Consecuencia operacional. Tarea a condición. Se activa ante fuga de contador o evento hidráulico.                                                                    | Inspeccionar según señal de fuga de contador, revisar válvulas, matriz y submatriz. Si se confirma, reparar fuga o corregir cierre de válvula. Responsable: Gerencia de Operaciones, en coordinación con jefes de riego.                                                            |

Fuente: Elaboración propia. Los intervalos son iniciales y deben ajustarse con la evidencia acumulada en el registro de intervenciones.

Tabla 27: Tareas transversales recomendadas para el sistema de riego.

| <b>Tarea transversal</b>                     | <b>Propósito</b>                                                                                                                                                                                     | <b>Intervalo o criterio de activación</b>                                                                          | <b>Responsable</b>                                                                                       |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aforo de emisores en terreno                 | Verificar la precipitación estimada en terreno y contrastarla con la referencia operacional utilizada en el diagnóstico.                                                                             | Mensual durante la temporada, priorizando sectores con desviación de precipitación o referencias no validadas.     | Jefes de riego.                                                                                          |
| Revisión de superficies del Maestro de Riego | Corregir inconsistencias de información que puedan generar una precipitación de referencia no representativa.                                                                                        | Una vez por temporada, antes de la programación del riego, y cada vez que se detecte una inconsistencia relevante. | Gerencia de Operaciones, con superficies reportadas por jefes de riego.                                  |
| Diagnóstico operacional de Fase 0            | Monitorear el desempeño de los equipos y detectar señales recurrentes de desviación, fuga, incumplimiento o pérdida de desempeño.                                                                    | Revisión diaria de datos y consolidación semanal para priorización operacional.                                    | Gerencia de Operaciones.                                                                                 |
| Hoja de vida de intervenciones por equipo    | Registrar de forma estructurada cada intervención, incorporando equipo, sector, componente, modo de falla probable, causa probable, acción ejecutada, repuestos, horas-hombre y condición posterior. | Cada vez que se realice una intervención correctiva, preventiva o de mejora sobre un equipo de riego.              | Jefes de riego y personal responsable de la intervención, con consolidación por Gerencia de Operaciones. |

Fuente: Elaboración propia.

El plan combina dos horizontes de acción coherentes con el enfoque general del trabajo. Por una parte, el diagnóstico operacional de Fase 0 opera con alta frecuencia, diaria y semanal, ya que se apoya en datos que el sistema genera de forma continua y su costo de ejecución es bajo. A este monitoreo se suma el aforo mensual de emisores que ya se realiza en terreno durante la temporada, el cual aporta una medición física periódica del comportamiento de los sectores.

Por otra parte, las tareas de inspección y prueba física se concentran en una frecuencia

mensual durante la temporada o se activan por condición y evento, evitando intervenciones de calendario que no respondan a la evidencia. Las tareas de búsqueda de falla sobre funciones ocultas, como la referencia de precipitación, las superficies del Maestro de Riego y la respuesta de solenoides, son especialmente relevantes porque corresponden a condiciones que pueden permanecer sin detección durante la operación normal del riego.

La hoja de vida de intervenciones se incorpora como una tarea transversal porque permite cerrar una brecha identificada durante el análisis: la falta de un historial estructurado de fallas, causas probables, acciones ejecutadas y condición posterior. Su aplicación no modifica el diagnóstico de la temporada analizada, pero genera la base necesaria para que, en temporadas futuras, el sistema pueda estimar recurrencias, tiempos entre fallas y costos por componente.

#### **8.8.1. La revisión de superficies como tarea de mantenimiento de la información**

Una de las tareas del plan merece un desarrollo particular, porque articula el hallazgo más transversal del trabajo con una acción concreta y de bajo costo: la revisión periódica de las superficies cargadas en el Maestro de Riego. El análisis mostró que la desviación de solo precipitación fue la señal hidráulica más frecuente del campo y que, en varios equipos, no respondía a un exceso real de aplicación de agua, sino a una referencia de precipitación que no representaba la condición real del sector. Dado que la precipitación de referencia depende del caudal y de la superficie del sector, una superficie cargada de forma desactualizada o inexacta en el Maestro puede producir una referencia errónea y, con ello, una desviación aparente que no corresponde necesariamente a una falla física.

Esta condición tiene dos características que la hacen idónea para una tarea de mantenimiento de la información. Primero, es una falla funcional oculta: una superficie o referencia mal

cargada no detiene el riego ni genera una alarma directa, por lo que solo se detecta al contrastar la operación contra la referencia, como lo hace el diagnóstico de la Fase 0. Segundo, su corrección es de bajo costo y alto impacto: no requiere intervenir físicamente el equipo, sino actualizar un dato que condiciona la evaluación de desempeño de los sectores asociados.

La tarea propuesta consiste en una revisión de superficies una vez por temporada, previa a la programación del riego, en la que la Gerencia de Operaciones contraste las superficies del Maestro de Riego con las superficies efectivas reportadas desde terreno por los jefes de riego. El flujo es directo: los jefes de riego entregan las superficies corregidas de cada sector, la Gerencia de Operaciones actualiza el Maestro y luego se revalida la referencia de precipitación. Esta revisión se complementa con el aforo mensual de emisores realizado durante la temporada, el cual entrega una medición física actualizada con la cual contrastar la referencia de precipitación sin requerir una campaña adicional de medición.

De esta forma, la corrección no se limita al Equipo 7, donde la condición se detectó con mayor claridad, sino que se aplica como una verificación sistemática del campo. La tarea permite abordar en origen un conjunto de desviaciones de solo precipitación que, de otro modo, podrían interpretarse caso a caso como problemas físicos de los equipos.

Esta tarea ilustra de manera concreta el concepto de mantenimiento de la información planteado en este trabajo. A diferencia de las tareas hidráulicas, no actúa sobre un componente físico, sino sobre la calidad del dato con que se evalúa el sistema. Sin embargo, comparte con ellas la misma lógica del RCM: identifica una falla funcional, determina que su consecuencia es oculta y define una tarea de búsqueda de falla con un intervalo definido. Su incorporación al plan de mantenimiento reconoce que, en un sistema de riego instrumentado, la calidad y consistencia de la información es una condición habilitante para interpretar correctamente el desempeño operacional



y orientar las decisiones sobre los componentes físicos.

## 9. Conclusiones

El presente trabajo desarrolló y aplicó una metodología de diagnóstico operacional y priorización de mantenimiento para equipos de riego agrícola presurizado del campo El Huaico, de Garcés Fruit, apoyada en el enfoque de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). El objetivo general se cumplió, ya que se estructuró un procedimiento que permite transformar información operacional disponible en un diagnóstico trazable del desempeño de los equipos, seleccionar casos relevantes para análisis en profundidad y traducir los hallazgos en funciones, fallas funcionales, modos de falla probables, consecuencias y tareas de mantenimiento. A continuación, se presentan las principales conclusiones organizadas según los objetivos específicos planteados.

**Caracterización del sistema de riego y su contexto operacional (OE1).** Se caracterizó el sistema de riego agrícola presurizado del campo El Huaico, identificando su estructura de activos, componentes principales, fuentes de información y condiciones de operación relevantes para el análisis de mantenimiento. Esta caracterización permitió establecer una jerarquía de análisis que distingue el equipo de riego como activo mantenible, el sector como unidad funcional de operación y el sector-día como unidad mínima para observar el desempeño operacional. Esta estructura fue fundamental para ordenar el sistema y mantener la trazabilidad entre datos, indicadores, antecedentes de terreno, hipótesis de falla y decisiones de mantenimiento.

**Definición de variables e indicadores operacionales (OE2).** Se definieron variables e indicadores operacionales asociados al caudal, la precipitación operacional, el cumplimiento del programa de riego, las fugas de contador y los eventos de terreno. Estos indicadores permitieron transformar registros operacionales dispersos en señales interpretables para el diagnóstico del sistema. En particular, las desviaciones de caudal y precipitación permitieron distinguir entre patrones

coherentes, desviaciones de solo caudal, desviaciones de solo precipitación, incumplimientos del programa y antecedentes de fuga. Esta clasificación fue relevante porque permitió evitar una interpretación directa y automática de toda desviación como falla física del equipo, incorporando también la posibilidad de inconsistencias de referencia, información incompleta o condiciones que requieren verificación en terreno.

**Construcción del procedimiento de diagnóstico y priorización (OE3).** Se construyó un procedimiento de diagnóstico y priorización basado en datos operacionales, denominado Fase 0, que permitió integrar la información disponible, evaluar recurrencias y seleccionar los equipos más relevantes para el análisis RCM. Este procedimiento transformó 9.400 registros sector-día en un ranking operacional de los diez equipos del campo, incorporando indicadores de caudal, precipitación operacional, cumplimiento del programa y fugas de contador. Además, se incorporó una segunda capa basada en eventos operacionales de terreno, construida de forma separada del puntaje operacional.

El análisis mostró que ambas capas entregan información complementaria. A nivel agregado de equipos, la correlación entre el ranking operacional y el ranking de eventos fue baja, por lo que esta comparación solo permitió una lectura descriptiva. Sin embargo, al analizar la relación a nivel sector-día, los eventos de terreno se asociaron con mayor claridad a los patrones coherentes y de solo caudal, mientras que las desviaciones de solo precipitación aparecieron sub-representadas cerca de eventos. Esto indica que los eventos tienden a coincidir con señales más compatibles con condiciones hidráulicas u operacionales detectables en terreno, pero no capturan de la misma forma las inconsistencias de referencia o información. Además, una alta proporción de los sector-día con señales más compatibles con condiciones hidráulicas u operacionales detectables en terreno, específicamente patrón coherente o de solo caudal, no tuvo ningún evento de terreno asociado, lo

que evidencia que la capa de eventos aún es incompleta. Esta brecha no se debe a la ausencia de un sistema de registro, sino a la falta de un mecanismo ordenado para ingresar los eventos a medida que ocurren, asignándolos al equipo y sector correspondientes. Por ello, ambas rutas de selección resultan necesarias: una basada en desempeño operacional recurrente y otra en recurrencia de eventos e intervenciones. Sin embargo, su complementariedad solo se aprovecha plenamente cuando el registro de eventos es completo y trazable.

**Aplicación del enfoque RCM a los equipos seleccionados (OE4).** Se aplicó el enfoque de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad a los equipos seleccionados, definiendo un catálogo común de funciones del equipo de riego y evaluando, para cada caso, el estado de dichas funciones. El análisis permitió evidenciar que los equipos seleccionados no representaban un único tipo de problema, sino situaciones de naturaleza distinta. El Equipo 7 correspondió principalmente a una inconsistencia en la referencia de precipitación, sin evidencia dominante de falla física. El Equipo 4 presentó un caso de convergencia entre desempeño operacional, presión y eventos de terreno, asociado principalmente a regulación de presión y contención, aunque con una hipótesis localizada de verificación de referencia en uno de sus sectores. El Equipo 5 mostró una menor entrega hidráulica localizada en el sector 2, con caudal y precipitación desviándose de forma coherente. El Equipo 2, por su parte, reflejó la recurrencia de fallas localizadas de componentes, principalmente válvulas, solenoides y elementos de control, sin una degradación agregada evidente del desempeño hidráulico.

Esta diversidad de casos confirma la utilidad de combinar la Fase 0 con el RCM. La Fase 0 permitió identificar señales recurrentes y priorizar equipos, mientras que el análisis RCM permitió interpretar esas señales en términos funcionales, separando fallas funcionales, modos de falla probables y causas probables. Esta separación fue clave para no confundir una desviación operacional

con una falla física confirmada ni una causa probable con el modo de falla observado.

**Determinación de lineamientos y tareas de mantenimiento (OE5).** Se determinaron lineamientos y tareas de mantenimiento para los modos de falla identificados, utilizando la lógica de decisión del RCM. Las tareas propuestas incluyen acciones a condición, búsqueda de falla, inspecciones dirigidas, corrección de referencias operacionales y registro estructurado de intervenciones. La metodología permitió diferenciar las acciones según la naturaleza del problema observado, evitando aplicar una misma solución a situaciones distintas.

En particular, se destaca la incorporación de tareas de mantenimiento de la información, orientadas a corregir referencias de precipitación, superficies o parámetros del Maestro de Riego cuando estos afectan la interpretación del desempeño del sistema. Esta conclusión es relevante porque, en sistemas de riego instrumentados, la calidad del dato condiciona directamente la lectura del desempeño operacional. Por lo tanto, mantener la información actualizada no es una tarea administrativa secundaria, sino una condición necesaria para que las decisiones de mantenimiento sobre activos físicos sean pertinentes.

Dentro de estas tareas de mantenimiento de la información se incluye también el ingreso ordenado y sistemático de los eventos de terreno. El análisis mostró que la confiabilidad de la segunda ruta de selección depende directamente de la calidad de ese registro: si los eventos no se ingresan de forma oportuna, completa y correctamente asignada al equipo y sector, la recurrencia de fallas queda subrepresentada y equipos relevantes pueden quedar fuera del análisis. A diferencia de la hoja de vida de intervenciones, que estructura el detalle de cada intervención por componente, este mecanismo apunta a la captura misma del evento en el momento en que ocurre. Por ello, se recomienda establecer un procedimiento formal de ingreso de eventos, con responsables, oportunidad de registro y campos mínimos definidos, tales como equipo, sector, fecha,

categoría y prioridad, que asegure que la información de terreno sea trazable y aprovechable para la priorización en temporadas futuras.

**Evaluación de coherencia, pertinencia y condiciones de aplicabilidad (OE6).** La metodología propuesta resultó coherente con el contexto operacional del sistema de riego y pertinente para apoyar la toma de decisiones de mantenimiento, ya que permite conectar indicadores operacionales con la lógica funcional del RCM. Su principal aporte es entregar una forma reproducible de decidir dónde aplicar el análisis de confiabilidad en un sistema con múltiples equipos, múltiples fuentes de información y recursos limitados. La metodología no reemplaza la validación en terreno, pero permite orientar mejor esa validación, priorizando los casos según evidencia operacional y no solo según percepción o respuesta correctiva.

Sin embargo, su aplicación presenta limitaciones asociadas a la calidad y completitud de los datos disponibles. Entre ellas se encuentran la ausencia de un historial estructurado de fallas por componente, la falta de costos reales de intervención, la disponibilidad de una sola temporada de análisis y la necesidad de validar en terreno algunas hipótesis levantadas desde los datos. Por ello, los resultados deben entenderse como una base metodológica y operacional para orientar decisiones, no como un plan cerrado ni definitivo. La implementación futura requiere fortalecer la hoja de vida de intervenciones, registrar causas probables y acciones ejecutadas con mayor consistencia, e incorporar seguimiento posterior para evaluar si las tareas propuestas reducen la recurrencia de eventos o mejoran el desempeño operacional.

En síntesis, el trabajo demuestra que la integración entre diagnóstico operacional y RCM permite avanzar desde una gestión principalmente reactiva hacia una lógica de mantenimiento más trazable, focalizada y basada en evidencia. La Fase 0 permite identificar dónde concentrar el análisis, mientras que el RCM permite definir qué hacer con los hallazgos detectados. Esta combinación

entrega una base útil para fortalecer la gestión de activos en sistemas de riego agrícola presurizado, siempre que se complemente con validación en terreno, seguimiento de tareas y fortalecimiento progresivo del registro de eventos e intervenciones.

## **10. Discusión**

### **10.1. El diagnóstico como puerta de entrada al RCM**

El RCM, en su formulación clásica, asume que el conjunto de activos a analizar ya está definido y se concentra en estructurar el análisis funcional de cada uno (Moubray, 1997). Sin embargo, en sistemas con múltiples equipos y recursos de mantenimiento acotados, la pregunta de a qué activos aplicar el análisis es previa y no trivial. La literatura sobre mantenimiento en sistemas de riego ha señalado que la gestión debe orientarse a sostener un nivel de servicio operacional más que a la reparación aislada de componentes (Huppert et al., 2003; Svendsen y Huppert, 2003), pero no entrega un criterio operativo para priorizar entre equipos a partir de datos de operación.

La Fase 0 desarrollada en este trabajo aborda precisamente ese vacío. Al construir la priorización sobre los registros operacionales que el sistema ya genera, en lugar de sobre un juicio experto o un historial de fallas inexistente, el enfoque resulta especialmente pertinente para realidades agrícolas donde no se dispone de series de confiabilidad pero sí de datos de operación abundantes. En este sentido, el trabajo no compite con el RCM clásico, sino que le antepone una etapa de focalización basada en evidencia, coherente con la lógica funcional que el propio RCM promueve.

### **10.2. Dos capas complementarias**

Uno de los resultados conceptualmente más relevantes se refiere a la relación entre el ranking operacional y el ranking complementario de eventos de terreno. A nivel agregado de equipos, ambos presentaron una correlación baja, lo que en una primera lectura podría interpretarse como independencia entre las capas. Sin embargo, el análisis a nivel sector-día mostró que esa lectura agregada es incompleta: los eventos de terreno sí se asocian de forma significativa con los patro-

nes más compatibles con condiciones hidráulicas u operacionales detectables en terreno, como el patrón coherente y el de solo caudal, y en cambio se encuentran subrepresentados frente a las desviaciones de solo precipitación. Las dos capas no son, por tanto, independientes; lo que ocurre es que cada una pondera de distinta manera los tipos de problema presentes en el campo.

Esta precisión es la que justifica mantener ambas rutas, sobre una base más sólida que la simple divergencia de los rankings. El ranking operacional captura tanto señales de pérdida de desempeño hidráulico como inconsistencias de información, que no necesariamente generan un evento en terreno; el ranking de eventos captura fallas de componentes e intervenciones registradas en campo. La baja correlación agregada se explica, entonces, por la composición del campo, con predominio de desviaciones de solo precipitación asociadas mayormente a información, y no por una ausencia de relación entre desempeño y fallas. A ello se suma que el registro de eventos es incompleto, lo que atenúa todavía más la correlación a nivel de equipo.

El Equipo 2 ilustra el valor de esta separación: con un desempeño operacional dentro de rango, no habría sido priorizado por la vía operacional, pese a concentrar una de las mayores cargas de intervención correctiva del campo. La existencia de la segunda ruta permitió reconocerlo como un caso legítimo de análisis de confiabilidad, orientado a la recurrencia de componentes más que a la pérdida de desempeño. Esta distinción entre regar fuera de rango de forma persistente y fallar con frecuencia constituye un aporte interpretativo que puede ser útil para otros sistemas de riego con características similares.

### **10.3. Falla del activo frente a falla de la información**

Uno de los hallazgos de mayor proyección del trabajo es la distinción entre una falla del activo y una falla en la información con que se evalúa el activo. El análisis del Equipo 7 ilustra esta distinción: pese a ubicarse en el segundo lugar del ranking operacional, no se identificó evidencia dominante de falla física, sino una evaluación contra una referencia de precipitación no representativa. El caudal se mantenía dentro de rango en todos los sectores, la uniformidad era alta y la presión adecuada; la desviación provenía de que la precipitación de referencia del Maestro era inferior a la precipitación estimada por aforo en los sectores no validados.

Esta distinción tiene una implicancia práctica directa. Una inspección física tradicional, orientada principalmente a localizar componentes dañados, podría no haber identificado el origen de la desviación del Equipo 7, e incluso podría haber conducido a revisar o intervenir componentes hidráulicos sin que existiera evidencia dominante de falla física. El enfoque adoptado, al mantener una función explícita de medición y referencia, y al exigir consistencia entre las señales de caudal y precipitación antes de afirmar una falla, permitió evitar ese sobrediagnóstico. Se desprende que, en sistemas de riego instrumentados, el mantenimiento de la confiabilidad de los datos constituye una tarea de mantenimiento en sí misma, tan relevante como la reparación física, porque condiciona la calidad de todas las decisiones que se toman a partir de esos datos.

Este fenómeno no se limitó a un equipo aislado. La desviación de solo precipitación fue el foco hidráulico más frecuente del campo, y se concentró en los equipos mejor ubicados del ranking operacional. Una parte importante de estas señales no corresponde a un exceso real de aplicación de agua, sino a diferencias entre la precipitación operacional registrada y la referencia del Maestro de Riego. En consecuencia, la actualización y validación de las referencias de precipitación del

Maestro, mediante aforos de terreno, emerge como una tarea de alcance sistémico para el campo, y no solo como una recomendación puntual para un equipo.

#### **10.4. Aporte a la política de mantenimiento del campo**

La política de mantenimiento actual del campo combina dos pilares: una mantención general programada antes de la temporada, de frecuencia anual, y reparaciones correctivas durante la temporada cuando un componente falla. Se trata de una política funcional, pero con puntos ciegos que los resultados de este trabajo permiten iluminar.

El primero es que una mantención de frecuencia anual aplica un mismo criterio a equipos que son distintos entre sí. Los resultados muestran que el Equipo 4 requiere vigilancia de presión durante la temporada, y que el Equipo 2 presenta una recurrencia de fallas de válvulas que una intervención anual no alcanza a contener. El segundo punto ciego es que el correctivo de temporada tiende a reparar el síntoma sin analizar la recurrencia: se reemplaza la válvula que falla, pero no necesariamente se registra por qué falla repetidamente. El tercero, y más distintivo, es que ni la mantención anual ni el correctivo abordan los problemas de datos y referencias detectados en el análisis, porque no corresponden a un componente roto.

El aporte del trabajo a la política de mantenimiento no consiste, por tanto, en reemplazar lo existente, sino en enriquecerlo con tres elementos: un criterio de priorización entre equipos basado en evidencia, un conjunto de tareas a condición que operan durante la temporada y no solo antes de ella, y la incorporación del mantenimiento de la información como una categoría de tarea hasta ahora ausente. Conviene precisar que el mantenimiento correctivo sigue siendo apropiado para fallas evidentes, localizadas y de bajo costo de reparación; el aporte está en discriminar cuáles

fallas justifican prevención y cuáles no, que es justamente lo que una política puramente reactiva no permite hacer. En términos de la evolución de la gestión del mantenimiento, el trabajo constituye un puente desde un esquema preventivo de calendario hacia un mantenimiento centrado en la condición y en la evidencia.

### **10.5. Registro estructurado de intervenciones: la hoja de vida del equipo**

Uno de los hallazgos transversales de este trabajo es que la principal limitación para profundizar el análisis de confiabilidad no fue la ausencia de datos operacionales, que resultaron abundantes, sino la falta de un historial estructurado de intervenciones de terreno. El análisis cuantificó esta brecha: una alta proporción de los sector-día con señales más compatibles con condiciones hidráulicas u operacionales detectables en terreno, específicamente patrón coherente o de solo caudal, no tuvo ningún evento de terreno asociado, lo que muestra que el registro no captura la totalidad de lo que ocurre en terreno. La carencia opera en dos niveles complementarios. El primero es de cobertura: muchos eventos no se ingresan al sistema, lo que debilita la segunda ruta de selección y subrepresenta la recurrencia real de fallas. El segundo es de estructura: incluso los eventos que se registran no siempre vinculan la intervención al componente y a su causa probable, lo que impide estimar frecuencias de falla, tiempos entre intervenciones y costos reales. Un mecanismo ordenado de ingreso de eventos, oportuno y correctamente asignado, aborda el primer nivel; la hoja de vida que se propone a continuación aborda el segundo. Esta brecha se manifestó de forma concreta en el análisis del Equipo 2, donde fue posible reconocer la recurrencia de fallas de válvulas durante la temporada, pero no caracterizarla como una serie de confiabilidad.

Conviene precisar que esta limitación no es principalmente tecnológica. La herramienta de

registro existe; lo que limita su aporte es su adopción en terreno, atribuible en gran medida a la fricción que implica completar registros detallados durante o después de una reparación. Cualquier propuesta de mejora que agregue pasos al trabajo del operador tiende a enfrentar la misma barrera. Por ello, la recomendación de este trabajo no se orienta a incorporar una herramienta adicional, sino a definir con precisión qué información mínima debe capturarse en cada intervención, de modo que el registro sea breve, repetible y directamente aprovechable por el análisis de confiabilidad.

Se propone estructurar esta información como una hoja de vida del equipo, entendida como el historial acumulado de intervenciones de cada activo a lo largo del tiempo. A diferencia de un registro de eventos aislados, la hoja de vida vincula cada intervención al equipo y componente correspondiente, lo que permite que la información se acumule de forma trazable temporada tras temporada. La Tabla 28 presenta los campos mínimos propuestos, seleccionados de modo que cada uno responda a una necesidad específica del análisis de confiabilidad.

Tabla 28: Campos mínimos propuestos para la hoja de vida de intervenciones por equipo.

| <b>Campo</b>                | <b>Propósito dentro del análisis de confiabilidad</b>                                                                                   |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Equipo, sector y componente | Localiza la intervención en la jerarquía de activos, permitiendo asociarla al activo mantenible y al sector afectado.                   |
| Fecha de la intervención    | Permite ordenar las intervenciones en el tiempo y, con su acumulación, estimar tiempos entre fallas y datar el inicio de una condición. |
| Síntoma observado           | Registra la manifestación detectada en terreno (por ejemplo, sector que no riega, válvula que pasa agua, baja presión).                 |
| Causa probable identificada | Distingue la condición que pudo originar la falla, separándola del síntoma observado.                                                   |
| Acción ejecutada            | Describe la intervención realizada (reparación, reemplazo, ajuste, limpieza).                                                           |
| Repuesto utilizado          | Permite identificar componentes con recambio recurrente y aproximar el costo material de la intervención.                               |
| Tiempo o recurso empleado   | Registra las horas-hombre u otros recursos, base para estimar el costo de mano de obra hoy disponible solo de forma referencial.        |
| Condición posterior         | Indica si el equipo quedó operativo o requiere seguimiento, cerrando el ciclo de la intervención.                                       |

Fuente: Elaboración propia.

La definición de estos campos es deliberadamente acotada. Cada uno responde a una limitación concreta identificada en este estudio: la fecha habilita la estimación de tiempos entre fallas y la datación de condiciones, como la observada en el Equipo 5; el repuesto y el tiempo empleado permiten sustituir progresivamente los costos referenciales por costos reales; y la causa probable, separada del síntoma, evita que el historial se limite a describir lo aparente sin registrar el origen probable de la falla. Mantener el conjunto reducido es parte de la propuesta, ya que un formulario extenso reproduciría la fricción que hoy explica el bajo uso del registro existente.

La propuesta no prescribe un soporte tecnológico específico. La hoja de vida puede implementarse sobre el sistema de registro ya disponible, en una planilla estructurada o en cualquier otro medio que la empresa considere adecuado, siempre que se respeten los campos mínimos y la asociación de cada intervención al equipo correspondiente. Lo esencial no es el medio, sino que la captura sea de baja fricción y que la información se acumule de forma trazable; el medio debería integrarse al flujo de trabajo existente del operador en lugar de competir con él.

El formato propuesto se organiza en dos niveles complementarios. El primero corresponde a una ficha individual de intervención, que captura los antecedentes mínimos de cada evento, en línea con los campos de la Tabla 28: equipo, sector y componente intervenido, fecha, síntoma observado, causa probable identificada, acción ejecutada, repuesto y recurso utilizado, y condición posterior. El segundo corresponde a la hoja de vida acumulada del equipo, donde cada fila resume una intervención registrada durante la temporada. Esta separación permite mantener un registro simple para el trabajo de terreno y, al mismo tiempo, construir una base histórica ordenada para el análisis de confiabilidad.

## **10.6. De un sistema de monitoreo a una lógica de diagnóstico operacional escalable**

Los resultados de este trabajo permiten plantear una reflexión de mayor alcance sobre la gestión del mantenimiento en sistemas de riego compuestos por múltiples campos, equipos, sectores y fuentes de información. En estos contextos, disponer de tableros de visualización que muestren desviaciones operacionales, o definir mantenciones rígidas por calendario, resulta insuficiente. La razón es la que este estudio mostró de forma concreta: no todas las desviaciones significan lo mismo.

Una misma señal de desviación puede corresponder a una condición hidráulica real, a un problema de programación, a un evento externo, a un dato maestro desactualizado, a una superficie mal cargada, a una referencia de precipitación no representativa o, incluso, a una condición que ya fue corregida en terreno. Los casos analizados en este trabajo ilustran esta diversidad: la desviación del Equipo 7 correspondía a una referencia de precipitación y no a una falla física dominante; la del Equipo 5, en cambio, correspondía a una menor entrega hidráulica efectiva y localizada; y la del Equipo 2 no se expresaba como desviación sostenida, sino como recurrencia de fallas de componentes. Tres señales de naturaleza distinta que exigen respuestas distintas.

De aquí se desprende que el desafío central no es detectar desviaciones, sino interpretar su significado operacional y decidir, en consecuencia, cuándo corresponde revisar datos, validar en terreno, dejar una condición en observación, actualizar el Maestro de Riego, escalar a operaciones o intervenir físicamente con mantenimiento. Esta capa de interpretación, situada entre la visualización del dato y la ejecución de la acción, es precisamente la función que cumple la Fase 0 desarrollada en este trabajo.

### **10.6.1. Frecuencias diferenciadas de revisión e intervención**

Una consecuencia directa de esta lógica es que la observación de los datos y la intervención física no deben operar al mismo ritmo. La revisión de datos debería ser frecuente, idealmente diaria durante la temporada, para detectar oportunamente nuevas alertas. El análisis de patrones debería consolidarse de forma semanal, para distinguir recurrencias de eventos puntuales, que es la escala de agregación adoptada en este estudio. La revisión de prioridades debería realizarse de forma mensual, para diferenciar los problemas vigentes de los ya resueltos y reordenar la atención. La intervención física, en cambio, no debería regirse por una frecuencia fija de calendario, sino activarse por condición, evento o temporada, de acuerdo con la evidencia acumulada.

Esta separación entre el ritmo de observación y el ritmo de acción es una de las ideas centrales del enfoque: los datos se revisan con alta frecuencia, pero la intervención física se realiza de manera selectiva y justificada. De este modo, el sistema deja de ser una herramienta puramente descriptiva de monitoreo y se transforma en una lógica de diagnóstico operacional, en la que cada señal se interpreta antes de traducirse en una acción.

### **10.6.2. Direcciones de desarrollo del enfoque**

Las características del enfoque permiten proyectar su desarrollo en varias direcciones, que comparten un rasgo común: el valor de la metodología aumenta con su uso sostenido en el tiempo. La dirección más relevante es la acumulación de información a lo largo de múltiples temporadas. Dado que la Fase 0 y el registro de intervenciones generan datos de forma continua, su acumulación sistemática permitiría estimar las tasas de falla, los tiempos medios entre fallas y los costos reales por componente que hoy no están disponibles, transformando una limitación del presente estudio

en una capacidad incremental de la gestión. A ello se suma la replicación de la metodología a los demás campos de la empresa, que comparten las mismas fuentes de información; la extensión del análisis a los equipos no abordados; y la cuantificación progresiva de los costos a medida que se incorporen datos propios.

### **10.6.3. El rol potencial del diagnóstico asistido**

La capa de interpretación descrita es también donde un modelo de diagnóstico asistido, eventualmente apoyado en técnicas de aprendizaje automático, podría aportar valor a futuro. Su función no sería reemplazar el criterio técnico, sino ayudar a reconocer patrones, clasificar señales, diferenciar el ruido de los problemas reales, sugerir hipótesis preliminares y orientar qué casos requieren acción inmediata, seguimiento o validación. En un sistema con muchos campos y equipos, una capa de este tipo permitiría escalar la interpretación que en este trabajo se realizó de forma acotada.

Es importante precisar el lugar que ocuparía esta proyección respecto del trabajo desarrollado. La Fase 0 de esta tesis ya constituye esa capa de interpretación, implementada mediante reglas explícitas: umbrales definidos, clasificación de patrones y una fórmula de priorización con ponderaciones conocidas. Un modelo de diagnóstico asistido no partiría de cero, sino que escalaría una lógica que aquí quedó establecida y validada sobre un caso real.

Esta base de reglas explícitas tiene, además, una ventaja que conviene conservar en cualquier evolución futura: es interpretable y auditable. Cualquier resultado del diagnóstico puede rastrearse hasta la regla y la evidencia que lo originaron, lo que permite justificar por qué un equipo fue priorizado o por qué una señal fue tratada como problema de datos y no como falla física. En la gestión del mantenimiento, donde cada intervención implica costo y movilización de recursos, la

capacidad de justificar una decisión es tan relevante como la decisión misma. Por ello, un eventual modelo de diagnóstico asistido debería incorporarse como complemento que ayude a reconocer patrones más sutiles, preservando la trazabilidad del criterio, y no como una caja negra que entregue prioridades sin explicación.

En síntesis, el aporte conceptual de este trabajo trasciende el caso del campo El Huaico. La propuesta apunta a transitar desde un esquema de monitoreo descriptivo y mantención por calendario hacia una lógica de diagnóstico operacional escalable, en la que los datos se revisan con alta frecuencia, su significado se interpreta de forma estructurada y trazable, y la intervención física se reserva para los casos en que la evidencia la justifica. La Fase 0 desarrollada en esta tesis constituye una primera materialización de esa lógica, aplicable y extensible a sistemas de riego de mayor escala.

## 11. Limitaciones

El alcance de los resultados de este trabajo debe interpretarse considerando las limitaciones que se declaran a continuación. Estas delimitan la validez de las conclusiones, las condiciones bajo las cuales fue aplicado el enfoque y los aspectos que requieren profundización en futuras temporadas.

**Ausencia de un historial estructurado de fallas.** La principal limitación del estudio no corresponde a la cantidad de datos disponibles, sino a su naturaleza. El campo cuenta con registros operacionales detallados, pero no con un historial estructurado de intervenciones de temporadas anteriores. Esta condición limita la posibilidad de estimar tasas de falla, tiempos medios entre fallas, patrones de envejecimiento de componentes o intervalos adecuados de mantenimiento, ya que dichos análisis requieren varios ciclos de observación. Por ello, cuando el trabajo hace referencia a la recurrencia de fallas, esta debe entenderse como recurrencia observada dentro de la temporada analizada y no como una tasa de falla establecida. Esta limitación define el punto de partida del estudio y fundamenta la propuesta de una hoja de vida del equipo, orientada a cerrar progresivamente esta brecha mediante el registro estructurado de intervenciones.

En este sentido, la hoja de vida de intervenciones propuesta en la Discusión debe entenderse como una respuesta directa a esta limitación. Su implementación permitiría acumular información trazable por equipo, sector y componente, generando en futuras temporadas la base necesaria para estimar tasas de falla, tiempos entre intervenciones, costos reales y criterios más robustos para definir intervalos de mantenimiento.

**Análisis basado en una sola temporada de operación.** El diagnóstico se construyó a partir de los registros de una única temporada de riego. Si bien la información operacional disponible

fue suficiente para desarrollar la Fase 0, priorizar equipos y aplicar el análisis RCM a los casos seleccionados, una sola temporada no permite distinguir con total certeza entre comportamientos estructurales del sistema y variaciones propias de un ciclo particular de operación. La validación de los patrones observados requiere su seguimiento a lo largo de temporadas sucesivas.

**Evaluación económica referencial.** El análisis de consecuencias económicas se abordó de manera referencial y cualitativa. Los antecedentes asociados a energía de bombeo, mano de obra y repuestos permiten establecer órdenes de magnitud y comparar impactos relativos, pero no corresponden a costos efectivos levantados sistemáticamente desde la empresa para cada intervención. Por esta razón, las consecuencias se evaluaron mediante una escala cualitativa ordinal y no mediante un análisis costo-beneficio cuantitativo de las tareas de mantenimiento propuestas. Para una aplicación económica más precisa, estos valores deben ser reemplazados por costos propios de operación, intervención, repuestos y tiempos de detención.

**Hipótesis pendientes de verificación en terreno.** La metodología utiliza la evidencia operacional para orientar el diagnóstico, priorizar equipos y formular hipótesis de falla, pero no para confirmar por sí sola la causa probable de cada desviación. En consecuencia, varios modos de falla quedan planteados a partir de su manifestación operacional, con causas probables que aún requieren verificación en terreno. Entre ellos se encuentran la menor entrega de agua coherente y sostenida del sector 2 del Equipo 5, cuya causa probable sería una restricción por válvula, regulador o línea; el sobrecaudal con presión de operación elevada del Equipo 4, asociado a una regulación que podría no mantener la presión dentro del rango de diseño; y la apertura o cierre deficiente recurrente de válvulas del Equipo 2, asociada al deterioro o desajuste de componentes. El análisis permite definir qué revisar y dónde concentrar la inspección, pero la confirmación de la causa probable exige medición directa, inspección física o seguimiento operacional posterior.

**Antecedentes técnicos no disponibles.** Algunos antecedentes que habrían permitido profundizar el análisis no se encontraban disponibles al momento del estudio. En particular, no se contó con información sistemática sobre antigüedad, lote de fabricación, fecha de instalación o historial de recambio de componentes como válvulas, solenoides, reguladores y elementos de control. Esta ausencia impide determinar si la recurrencia de ciertos eventos responde a fatiga por antigüedad, calidad del componente, condiciones de presión, régimen de uso o una combinación de estos factores. Por ello, estas relaciones quedan como hipótesis abiertas que deberán evaluarse con información acumulada en futuras temporadas.

**Calidad y completitud de los antecedentes de terreno.** Los antecedentes levantados en terreno, especialmente aquellos provenientes de BaumSystem, se utilizaron como información complementaria para contextualizar el diagnóstico. Sin embargo, estos registros no tienen la misma continuidad ni estructura que los datos automáticos de Agronic. Su incorporación depende de la oportunidad del registro, la correcta asignación a equipos o sectores y la completitud de la información ingresada. Por esta razón, los eventos de terreno se utilizaron en un ranking complementario separado y no como parte del puntaje operacional principal. Esta limitación es la misma brecha que, según se argumenta en la Discusión y las Conclusiones, un mecanismo ordenado de ingreso de eventos y la hoja de vida del equipo permitirían cerrar de forma progresiva, mejorando la cobertura y la trazabilidad de la segunda ruta de selección en futuras temporadas.

**Alcance acotado del análisis RCM en profundidad.** El análisis RCM detallado se aplicó a cuatro de los diez equipos del campo El Huaico. Estos equipos fueron seleccionados por representar situaciones metodológicamente diferenciadas: confiabilidad de la información, convergencia entre desempeño y eventos, menor entrega hidráulica localizada y recurrencia de fallas de componentes. Los seis equipos restantes fueron caracterizados mediante la Fase 0, pero no fue-

ron analizados con el mismo nivel de detalle mediante las siete preguntas del RCM. Por lo tanto, quedan pendientes de una aplicación posterior de la metodología.

**Carácter de caso de estudio.** Los resultados específicos corresponden al campo El Huaico, con sus propias condiciones de cultivo, infraestructura, programación, operación y disponibilidad de datos. Si bien la metodología propuesta es replicable en otros campos con sistemas de riego presurizado y registros operacionales comparables, las conclusiones particulares sobre los equipos analizados no deben extrapolarse directamente sin repetir el procedimiento sobre los datos y condiciones de cada sistema.

En conjunto, estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, sino que precisan su alcance. El trabajo entrega un análisis cualitativo de confiabilidad y un procedimiento reproducible de priorización operacional, sujeto a profundización a medida que se disponga de más temporadas, mejores registros de intervención y costos propios de la empresa. Varias de las limitaciones identificadas, especialmente la falta de historial estructurado y la ausencia de costos efectivos por componente, corresponden a brechas que el propio enfoque permite abordar progresivamente mediante la hoja de vida del equipo y la acumulación sistemática de información operacional y de mantenimiento.

## 12. Anexos

### 12.1. Anexo A: Plano general del sistema de riego

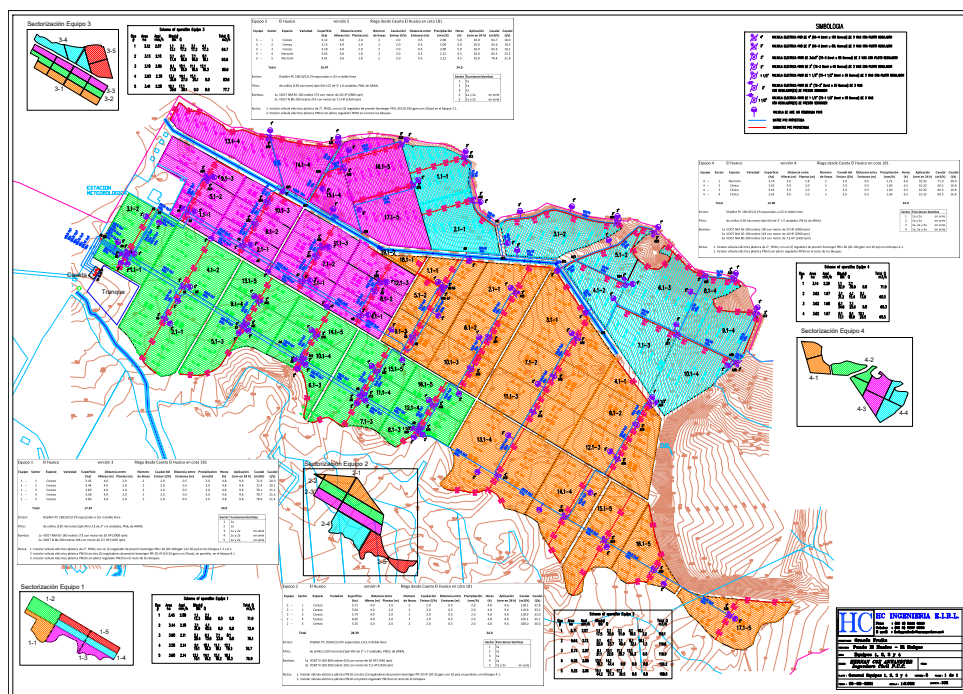


Figura 6: Plano general del sistema de riego del campo El Huaico.

### 12.2. Anexo B: Reproducibilidad del diagnóstico operacional

Este anexo documenta las reglas de cálculo utilizadas para construir el diagnóstico operacional de la Fase 0, con el fin de dejar trazabilidad de los umbrales, fórmulas y ponderaciones aplicadas. Se describen, en orden, el cálculo de las variables base, la clasificación de las desviaciones, la verificación de consistencia entre caudal y precipitación, el puntaje operacional sector-día, el puntaje recurrente operacional por equipo y el ranking complementario de eventos operacionales de terreno.

### 12.2.1. Umbrales utilizados

Tabla 29: Umbrales utilizados en el diagnóstico operacional.

| Umbral | Uso                                                                                                                                                               |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 %    | Definir riegos hidráulicamente estables y validar la coincidencia entre la precipitación operacional estable y la precipitación estimada desde aforos de terreno. |
| 10 %   | Clasificar desviaciones relevantes de caudal, de precipitación operacional y de cumplimiento del programa de riego.                                               |
| 20 %   | Clasificar desviaciones fuertes de caudal o de precipitación operacional.                                                                                         |

Fuente: Elaboración propia.

### 12.2.2. Cálculo de variables base

Las horas reales de riego se calculan a partir del tiempo total registrado por Agronic, expresado en segundos:

$$H_{\text{real}} = \frac{T_{\text{riego}}}{3600}, \quad (16)$$

donde  $H_{\text{real}}$  corresponde a las horas reales de riego y  $T_{\text{riego}}$  corresponde al tiempo total de riego registrado en segundos.

La desviación de caudal se calcula manteniendo el signo de la diferencia entre el caudal real y el caudal teórico:

$$\text{Desv}_Q = \left( \frac{Q_{\text{real}} - Q_{\text{teórico}}}{Q_{\text{teórico}}} \right) \times 100. \quad (17)$$

La precipitación operacional se calcula a partir de la lámina aplicada y el tiempo real de riego:

$$\text{Prec}_{\text{Agronic}} = \frac{L_{\text{riego}}}{T_{\text{riego}}/3600}, \quad (18)$$

donde  $\text{Prec}_{\text{Agronic}}$  corresponde a la precipitación operacional del sector-día, expresada en mm/h;  $L_{\text{riego}}$  corresponde a la lámina aplicada durante el riego, expresada en mm; y  $T_{\text{riego}}$  corresponde al tiempo total de riego registrado en segundos.

En este anexo, la notación de precipitación se utiliza de la siguiente forma:  $\text{Prec}_{\text{Agronic}}$  representa la precipitación operacional calculada a partir de la lámina y el tiempo de riego, en consistencia con la Metodología;  $\text{Prec}_{\text{aforo}}$  representa la precipitación estimada a partir de aforos de emisores realizados en terreno;  $\text{Prec}_{\text{Maestro}}$  representa la precipitación registrada en el Maestro de Riego;  $\text{Prec}_{\text{Agronic,estable}}$  representa la precipitación operacional calculada en riegos hidráulicamente estables;  $\text{Prec}_{\text{ref}}$  representa la precipitación de referencia operacional utilizada para evaluar la desviación; y  $\text{Prec}_{\text{semana}}$  representa la precipitación semanal recalculada a partir de la lámina total y el tiempo total de riego.

Se consideran riegos hidráulicamente estables aquellos sectores-día con riego real registrado y desviación absoluta de caudal menor o igual al 5 %. El conjunto de días estables del sector  $s$  se define como:

$$\mathcal{E}_s = \{ d : T_{\text{riego},sd} > 0 \wedge |\text{Desv}_{Q,sd}| \leq 5\% \}. \quad (19)$$

A partir de estos registros, la precipitación operacional estable del sector se calcula como:

$$\text{Prec}_{\text{Agronic,estable},s} = \frac{\sum_{d \in \mathcal{E}_s} L_{\text{riego},sd}}{\sum_{d \in \mathcal{E}_s} (T_{\text{riego},sd}/3600)}. \quad (20)$$

Cuando el conjunto  $\mathcal{E}_s$  no cuenta con registros válidos, la precipitación operacional estable no se utiliza para validar el aforo y se mantiene la precipitación del Maestro de Riego como referencia operacional.

La precipitación de referencia operacional se define a partir de la comparación entre la precipitación estimada por aforo y la precipitación operacional observada en riegos hidráulicamente estables. Solo cuando existe un aforo válido y existen riegos estables válidos se evalúa la diferencia relativa entre ambas referencias; si esa diferencia no supera el 5 %, se adopta la precipitación de aforo. En cualquier otro caso, se mantiene la precipitación del Maestro de Riego:

$$\text{Prec}_{\text{ref}} = \begin{cases} \text{Prec}_{\text{aforo}}, & \text{si } \left| \frac{\text{Prec}_{\text{aforo}} - \text{Prec}_{\text{Agronic,estable}}}{\text{Prec}_{\text{Agronic,estable}}} \right| \leq 0,05, \\ \text{Prec}_{\text{Maestro}}, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad (21)$$

A partir de esta referencia se calcula la desviación de precipitación operacional:

$$\text{Desv}_{\text{prec}} = \left( \frac{\text{Prec}_{\text{Agronic}} - \text{Prec}_{\text{ref}}}{\text{Prec}_{\text{ref}}} \right) \times 100. \quad (22)$$

El cumplimiento del programa de riego se evalúa comparando las horas reales ejecutadas con las horas programadas para cada sector-día:

$$\text{Desv}_H = \left( \frac{H_{\text{real}} - H_{\text{programada}}}{H_{\text{programada}}} \right) \times 100. \quad (23)$$

Cuando  $H_{\text{programada}} = 0$ , la desviación porcentual no se calcula. En esos casos, si existe riego real, el registro se clasifica como riego no programado; si no existe riego real, se considera que no existe incumplimiento del programa para el sector-día.

Para efectos del puntaje operacional, se considera incumplimiento del programa cuando la desviación absoluta de horas supera el 10 %, o cuando existe riego real en un sector-día sin horas programadas:

$$I_{\text{prog}} = \begin{cases} 1, & H_{\text{programada}} > 0 \wedge |\text{Desv}_H| > 10 \%, \\ 1, & H_{\text{programada}} = 0 \wedge H_{\text{real}} > 0, \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad (24)$$

El cálculo de variables hidráulicas, la desviación de precipitación y la clasificación de consistencia caudal-precipitación se aplican únicamente a los sectores-día con riego real registrado. El cumplimiento del programa de riego, en cambio, se evalúa para todos los sectores-día con programación disponible.

### 12.2.3. Clasificación de caudal y precipitación operacional

Tabla 30: Clasificación de caudal y precipitación operacional.

| Criterio                                 | Clasificación                                   |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $ \text{Desv}_Q  \leq 10 \%$             | Caudal dentro de rango operacional              |
| $\text{Desv}_Q > 10 \%$                  | Sobrecaudal                                     |
| $\text{Desv}_Q < -10 \%$                 | Subcaudal                                       |
| $ \text{Desv}_Q  \geq 20 \%$             | Desviación fuerte de caudal                     |
| $ \text{Desv}_{\text{prec}}  \leq 10 \%$ | Precipitación dentro de rango operacional       |
| $\text{Desv}_{\text{prec}} > 10 \%$      | Precipitación mayor a la referencia operacional |
| $\text{Desv}_{\text{prec}} < -10 \%$     | Precipitación menor a la referencia operacional |
| $ \text{Desv}_{\text{prec}}  \geq 20 \%$ | Desviación fuerte de precipitación              |

Fuente: Elaboración propia.

#### 12.2.4. Consistencia caudal-precipitación

La consistencia entre caudal y precipitación se evalúa comparando el sentido de ambas desviaciones, considerando desviadas las variables cuya magnitud absoluta supera el 10 %.

Tabla 31: Clasificación de consistencia caudal-precipitación.

| Condición                                         | Clasificación               | Interpretación                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Subcaudal y precipitación menor a la referencia   | Coherente: menor entrega    | Patrón consistente con menor entrega hidráulica o menor intensidad de aplicación.                                                                                     |
| Sobrecaudal y precipitación mayor a la referencia | Coherente: mayor entrega    | Patrón consistente con mayor entrega hidráulica o mayor intensidad de aplicación.                                                                                     |
| Subcaudal y precipitación mayor a la referencia   | Contradictorio              | Caso que requiere revisar el caudal registrado, la lámina aplicada, el tiempo de riego, la superficie, la referencia de precipitación o la configuración operacional. |
| Sobrecaudal y precipitación menor a la referencia | Contradictorio              | Caso que requiere revisar el caudal registrado, la lámina aplicada, el tiempo de riego, la superficie, la referencia de precipitación o la configuración operacional. |
| Solo caudal desviado                              | Parcial: solo caudal        | Señal parcial asociada al caudal registrado.                                                                                                                          |
| Solo precipitación desviada                       | Parcial: solo precipitación | Señal parcial asociada a la intensidad de aplicación o a la referencia operacional de precipitación.                                                                  |
| Caudal y precipitación dentro de rango            | Sin desviación relevante    | No se observa desviación hidráulica relevante para el sector-día.                                                                                                     |

Fuente: Elaboración propia.

#### 12.2.5. Puntaje operacional sector-día

El puntaje operacional sector-día integra cuatro componentes: el patrón de consistencia, la severidad de las desviaciones, las fugas de contador y el cumplimiento del programa de riego:

$$P_{sd} = P_{patrón} + P_{sev} + P_{fuga} + P_{prog}. \quad (25)$$

El componente de patrón ( $P_{patrón}$ ) asigna un puntaje según el tipo de consistencia del sector-día. El componente de severidad ( $P_{sev}$ ) se suma cuando existen desviaciones fuertes, definidas como aquellas cuya magnitud absoluta es mayor o igual a 20 %: en los casos no contradictorios, suma 5 puntos por cada variable con desviación fuerte, mientras que en los casos contradictorios se acota a un valor fijo de 3 puntos cuando al menos una de las variables presenta desviación fuerte. El componente de fuga ( $P_{fuga}$ ) incorpora los eventos de fuga de contador asociados al sector-día,

con un tope máximo de 3 puntos. Finalmente, el componente de cumplimiento ( $P_{\text{prog}}$ ) distingue si el incumplimiento del programa coincide o no con un patrón de desviación hidráulica. La Tabla 32 resume estas ponderaciones.

Tabla 32: Ponderaciones del puntaje operacional sector-día.

| Componente   | Condición                                                     | Puntaje                 |
|--------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Patrón       | Caudal y precipitación desviados coherentemente               | 8                       |
| Patrón       | Solo caudal desviado                                          | 4                       |
| Patrón       | Solo precipitación desviada                                   | 2                       |
| Patrón       | Caudal y precipitación contradictorios                        | 1                       |
| Patrón       | Caudal y precipitación dentro de rango operacional            | 0                       |
| Severidad    | Desviación fuerte de caudal, en caso no contradictorio        | +5                      |
| Severidad    | Desviación fuerte de precipitación, en caso no contradictorio | +5                      |
| Severidad    | Caso contradictorio con al menos una desviación fuerte        | 3 (valor fijo)          |
| Fuga         | Evento de fuga de contador asociado al sector-día             | +1 por evento, máximo 3 |
| Cumplimiento | Incumplimiento con desviación coherente o parcial             | 3                       |
| Cumplimiento | Incumplimiento aislado o en caso contradictorio               | 1                       |
| Cumplimiento | Sin incumplimiento del programa                               | 0                       |

Fuente: Elaboración propia. La justificación de la jerarquía 8-4-2-1 se desarrolla en la Metodología (Sección 7.2.10).

El componente de cumplimiento del programa se calcula a partir del indicador  $I_{\text{prog}}$ , definido en la Ecuación 24:

$$P_{\text{prog}} = \begin{cases} 3, & I_{\text{prog}} = 1 \wedge \text{el sector-día presenta desviación coherente o parcial,} \\ 1, & I_{\text{prog}} = 1 \wedge \text{el incumplimiento es aislado o se presenta en un caso contradictorio,} \\ 0, & I_{\text{prog}} = 0. \end{cases} \quad (26)$$

### 12.2.6. Fugas de contador

Las fugas de contador provienen de los registros de Agronic y se incorporan como un componente del puntaje operacional sector-día cuando existe una asignación trazable entre el contador y el sector evaluado. El puntaje por fuga corresponde al número de eventos de fuga de contador asociados al sector-día, con un tope máximo de 3 puntos:

$$P_{\text{fuga}} = \text{mín} (N_{\text{eventos fuga}}, 3), \quad (27)$$

donde  $N_{\text{eventos fuga}}$  corresponde al número de eventos de fuga de contador registrados para el sector-día. El tope evita que un único sector-día con múltiples eventos domine el puntaje del equipo. La fuga de contador se considera un antecedente operacional de posible paso de agua no asignado, y no una falla confirmada del sector.

Cuando el contador se asocia de forma unívoca a un sector, la fuga se incorpora al sector-día correspondiente. Cuando el contador corresponde a infraestructura compartida o no permite una asignación única a sector, la fuga se mantiene como antecedente a nivel de equipo o contador, evitando duplicar su efecto en varios sectores.

### 12.2.7. Puntaje recurrente operacional por equipo

El puntaje operacional acumulado del equipo corresponde a la suma del puntaje operacional de todos sus sector-día durante el período analizado:

$$P_{\text{op,total}} = \sum P_{\text{sd}}. \quad (28)$$

Para la agregación semanal, la precipitación se recalcula primero a nivel sector-semana, a partir de la lámina total y el tiempo total de riego del sector durante la semana, en lugar de promediar las precipitaciones diarias:

$$\text{Prec}_{\text{semana},sw} = \frac{\sum_{d \in w} L_{\text{riego},sd}}{\sum_{d \in w} (T_{\text{riego},sd}/3600)}, \quad (29)$$

donde  $\text{Prec}_{\text{semana},sw}$  corresponde a la precipitación semanal del sector  $s$  en la semana  $w$ . A partir de esta agregación se identifica, para cada equipo y semana, la presencia de cada patrón en uno o más de sus sectores.

El puntaje recurrente operacional por equipo combina el puntaje operacional acumulado con la recurrencia semanal de los distintos patrones:

$$\begin{aligned} P_{\text{rec},\text{op}} = & P_{\text{op},\text{total}} + 8 N_{\text{sem coh}} + 4 N_{\text{sem solo Q}} + 2 N_{\text{sem solo prec}} \\ & + 1 N_{\text{sem contrad}} + 3 N_{\text{sem fuga}} + 1 N_{\text{sem incumplimiento}}, \end{aligned} \quad (30)$$

donde  $P_{\text{rec},\text{op}}$  es el puntaje recurrente operacional del equipo;  $P_{\text{op},\text{total}}$  es la suma del puntaje operacional sector-día durante el período; y cada término  $N$  corresponde al número de semanas en que el equipo presentó, en al menos un día, un patrón coherente de caudal-precipitación ( $N_{\text{sem coh}}$ ), una desviación solo de caudal ( $N_{\text{sem solo Q}}$ ), una desviación solo de precipitación ( $N_{\text{sem solo prec}}$ ), una contradicción caudal-precipitación ( $N_{\text{sem contrad}}$ ), una fuga de contador ( $N_{\text{sem fuga}}$ ) o un incumplimiento del programa de riego ( $N_{\text{sem incumplimiento}}$ ).

Tabla 33: Ponderaciones del puntaje recurrente operacional por equipo.

| Condición semanal                                | Puntaje |
|--------------------------------------------------|---------|
| Semana con patrón caudal-precipitación coherente | 8       |
| Semana con desviación solo de caudal             | 4       |
| Semana con desviación solo de precipitación      | 2       |
| Semana con contradicción caudal-precipitación    | 1       |
| Semana con fuga de contador                      | 3       |
| Semana con incumplimiento del programa           | 1       |

Fuente: Elaboración propia.

La ponderación de la contradicción caudal-precipitación forma parte de la regla general de cálculo. En el campo El Huaico, durante el período analizado, ningún equipo presentó semanas con este patrón, por lo que este término no aportó puntaje en los resultados obtenidos. Se mantiene en la formulación para conservar la generalidad del procedimiento y permitir su aplicación en otros contextos donde la contradicción sí pueda presentarse.

El puntaje recurrente operacional se interpreta como una medida de carga operacional acumulada durante el período analizado. Por lo tanto, su comparación directa es más robusta cuando los equipos presentan períodos de observación y niveles de exposición similares. En caso de requerir una comparación ajustada por exposición, puede calcularse un indicador complementario normalizado:

$$P_{\text{rec,op,norm}} = \frac{P_{\text{rec,op}}}{N_{\text{sd válidos}}}, \quad (31)$$

donde  $N_{\text{sd válidos}}$  corresponde al número de sectores-día con información válida durante el período analizado. Este indicador no reemplaza el ranking operacional acumulado, sino que permite contrastar si la prioridad observada se explica por recurrencia efectiva o por una mayor exposición de datos.

### 12.2.8. Ranking complementario de eventos operacionales de terreno

Los eventos operacionales de terreno provienen de registros manuales levantados durante la temporada y se incorporan como una capa complementaria, separada del puntaje operacional. El puntaje de eventos por equipo corresponde a la suma de los pesos de prioridad de los eventos asignados al equipo:

$$P_{ev,eq} = \sum_{i=1}^n W_{prioridad,i}, \quad (32)$$

donde  $n$  es el número de eventos asignados al equipo y  $W_{prioridad,i}$  es el peso de la prioridad del evento  $i$ , según la Tabla 34.

Tabla 34: Ponderación de eventos operacionales según prioridad.

| Prioridad del evento   | Peso |
|------------------------|------|
| Urgente                | 3    |
| Media                  | 2    |
| Baja                   | 1    |
| Sin prioridad definida | 0    |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35: Criterio de interpretación de la prioridad de eventos operacionales.

| Prioridad              | Criterio operacional                                                                                                                                  |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Urgente                | Evento con efecto funcional inmediato o potencialmente relevante sobre la operación del riego, que requiere intervención correctiva prioritaria.      |
| Media                  | Evento que requiere seguimiento o intervención, sin implicar necesariamente la detención inmediata del riego o una pérdida crítica de disponibilidad. |
| Baja                   | Evento de menor impacto operacional inmediato, asociado a observaciones, condiciones no críticas o requerimientos de revisión.                        |
| Sin prioridad definida | Registro sin clasificación de prioridad disponible. Se mantiene en la base, pero no suma al conteo ponderado.                                         |

Fuente: Elaboración propia.

Los eventos que corresponden a infraestructura compartida o que no admiten una asignación unívoca a un equipo se mantienen separados y no se suman al puntaje de ningún equipo, con el fin de evitar atribuciones incorrectas.

El ranking de eventos no se suma al puntaje recurrente operacional, ya que corresponde a una fuente de información distinta. Su función es complementar la priorización y aportar evidencia de terreno para contrastar los patrones detectados mediante datos operacionales.

### **12.2.9. Procedimiento de cálculo**

El diagnóstico operacional se construye siguiendo una secuencia de tres niveles de agregación: sector-día, sector-semana y equipo. El ranking complementario de eventos se calcula de forma paralela y separada.

**12.2.9.1. Nivel sector-día.** Para cada sector-día se evalúa el cumplimiento del programa de riego cuando existe programación disponible. En los sectores-día con riego real registrado, además, se calcula la desviación de caudal, la precipitación operacional, la precipitación de referencia operacional según la regla de validación por aforo, la desviación de precipitación respecto de esa referencia y la clasificación de consistencia entre caudal y precipitación. Posteriormente, se incorporan los antecedentes de fuga de contador cuando existe trazabilidad suficiente y se calcula el puntaje operacional sector-día.

**12.2.9.2. Nivel sector-semana.** Los sector-día se agregan por sector y semana ISO. Se recalcula la precipitación semanal a partir de la lámina y el tiempo totales del sector durante la semana, y se determina la presencia semanal de desviaciones coherentes, desviaciones parciales, contradicciones, fugas de contador e incumplimientos del programa.

**12.2.9.3. Nivel equipo.** Los resultados semanales de los sectores se agregan por equipo. Para cada equipo se suma el puntaje operacional de sus sector-día y se cuenta el número de semanas en que el equipo presentó cada patrón en al menos uno de sus sectores. Con ambos elementos se calcula el puntaje recurrente operacional, y los equipos se ordenan de mayor a menor puntaje para construir el ranking operacional.

**12.2.9.4. Ranking complementario de eventos.** De forma separada, los eventos operacionales de terreno se clasifican según prioridad, categoría y tipo funcional; se asignan a un equipo cuando existe trazabilidad suficiente; se separan los eventos de infraestructura compartida o sin asignación clara; y se calcula el puntaje de eventos por equipo. El ordenamiento resultante se contrasta con el ranking operacional para sustentar la selección de equipos por las dos rutas.

### **12.3. Anexo C: Formato de hoja de vida de intervenciones**

El presente anexo contiene el formato propuesto para el registro estructurado de intervenciones sobre equipos de riego. El instrumento se compone de una ficha individual por intervención y una hoja acumulada por equipo, con el objetivo de construir progresivamente un historial que permita estimar recurrencia de fallas, tiempos entre intervenciones y costos por componente.

## Formato de registro de intervención

Instrumento de captura individual. Se completa una ficha por cada intervención sobre un equipo de riego. Los campos están orientados a construir, con el tiempo, los indicadores de confiabilidad (tasa de falla, tiempo entre fallas, costo por componente) que requiere un análisis RCM cuantitativo.

### Identificación

|                 |  |                      |  |
|-----------------|--|----------------------|--|
| Equipo          |  | Sector               |  |
| Componente      |  | N° de ficha          |  |
| Fecha detección |  | Fecha intervención   |  |
| Responsable     |  | Tipo de intervención |  |

Tipo de intervención: marque Falla, Preventiva o Mejora. Esta distinción es la que permite contar fallas reales para estimar tasas.

### Clasificación de la intervención

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Modo de falla | <input type="checkbox"/> Rotura de membrana <input type="checkbox"/> Solenoide no opera <input type="checkbox"/> Válvula no cierra <input type="checkbox"/> Válvula no abre<br><input type="checkbox"/> Fuga en línea <input type="checkbox"/> Obstrucción/suciedad <input type="checkbox"/> Regulador descalibrado <input type="checkbox"/> Falla eléctrica/señal <input type="checkbox"/> Otro |
| Causa raíz    | <input type="checkbox"/> Desgaste normal <input type="checkbox"/> Sobrepresión <input type="checkbox"/> Mala instalación <input type="checkbox"/> Suciedad/sedimento<br><input type="checkbox"/> Antigüedad <input type="checkbox"/> Daño externo <input type="checkbox"/> Falla de fábrica <input type="checkbox"/> Indeterminada                                                               |

### Descripción

|                   |  |
|-------------------|--|
| Síntoma observado |  |
| Acción ejecutada  |  |

### Consecuencia y recursos

|                    |                                                         |                         |  |
|--------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------|--|
| ¿Afectó el riego?  | <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No | Horas fuera de servicio |  |
| Repuesto utilizado |                                                         | Costo repuesto (\$)     |  |
| Tiempo MO (h-h)    |                                                         | N° de personas          |  |

"¿Afectó el riego?" y "horas fuera de servicio" permiten evaluar la consecuencia operacional de la falla. El costo del repuesto y las horas-hombre alimentan el análisis costo-beneficio.

### Cierre

|                     |                                                                                                                             |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Condición posterior | <input type="checkbox"/> Operativo <input type="checkbox"/> Requiere seguimiento <input type="checkbox"/> Fuera de servicio |
| Observaciones       |                                                                                                                             |

Historial acumulado de intervenciones del equipo. Cada fila corresponde a una intervención registrada con el formato anterior. La acumulación de estos registros, temporada tras temporada, permite estimar la recurrencia de fallas, los tiempos entre intervenciones y los costos por componente.

|                |  |                    |  |
|----------------|--|--------------------|--|
| Equipo         |  | Especie / variedad |  |
| Nº de sectores |  | Temporada          |  |

[illegible]

## Referencias

- Alabas M. A. A. (2013). Evaluation the hydraulic performance of drip irrigation system with multi cases. *Global Journal of Researches in Engineering*, 13(2):1–7.
- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., y Smith M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Alves G. A. d. A., Cavalcante C. A. V., y Lopes R. S. (2015). Maintenance management: A study of reliability-centered maintenance for irrigation system. *Applied Engineering in Agriculture*, 31(2):227–234.
- Antúnez A., Mora D., y Felmer S. (2010). Eficiencia en sistemas de riego por goteo en el secano. *INIA Tierra Adentro*, pp. 40–43.
- Benjamini Y. y Hochberg Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1):289–300.
- Comisión Nacional de Energía (2026). Tarifas de suministro eléctrico, categoría riego agrícola. <https://www.cne.cl>. Cuadro tarifario de la distribuidora correspondiente a la zona del campo. Consultado en mayo de 2026.
- Dirección del Trabajo de Chile (2026). ¿cuál es el valor del ingreso mínimo mensual? <https://www.dt.gob.cl/portal/1626/w3-article-60141.html>. Consultado en mayo

de 2026. De acuerdo con la Ley N°21.751, el ingreso mínimo mensual para trabajadores mayores de 18 años y de hasta 65 años corresponde a \$539.000 desde el 1 de enero de 2026.

Doorenbos J. y Kassam A. H. (1979). *Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Fereres E. y Soriano M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2):147–159.

Geisbush J. R. (2024). *Using Reliability Centered Maintenance (RCM) Analyses to Develop Large Diameter Water Pipeline Maintenance Strategies*. Tesis doctoral, Arizona State University, Tempe, Arizona.

Huppert W., Svendsen M., y Vermillion D. L. (2003). Maintenance in irrigation: Multiple actors, multiple contexts, multiple strategies. *Irrigation and Drainage Systems*, 17:5–22.

International Organization for Standardization (2014a). Iso 55000:2014 asset management – overview, principles and terminology. International Standard.

International Organization for Standardization (2014b). Iso 55001:2014 asset management – management systems – requirements. International Standard.

Keller J. y Bliesner R. D. (1990). *Sprinkle and Trickle Irrigation*. Van Nostrand Reinhold, New York.

Lu J., Li H., Hu T., Geng C., y Yan S. (2022). Deficit drip irrigation based on crop evapotranspiration and precipitation forecast improves water-use efficiency and grain yield of summer maize. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(2):735–746.

Moubray J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance*. Butterworth-Heinemann, Oxford.

Naor A., Hupert H., Greenblat Y., Peres M., Kaufman A., y Klein I. (2001). The response of nectarine fruit size and midday stem water potential to irrigation level in stage iii and crop load. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126(1):140–143.

Nieto Serrano E., Campillo Torres C., Prieto Losada M. d. H., Pérez Izquierdo M., y Serrano Pérez P. (2018). *Manual Práctico de Riego. Cerezo*. Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura, Guadajira, Badajoz.

Steduto P., Hsiao T. C., Fereres E., y Raes D. (2012). *Crop Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Svendsen M. y Huppert W. (2003). Optimal maintenance in irrigation. *Irrigation and Drainage Systems*, 17:109–128.