

# Diseño de un Pivot central para regar cultivos forrajeros con aguas residuales

## RESUMEN

Para poder satisfacer la fluctuante demanda de agua de un cultivo mediante el uso de aguas residuales procedentes de plantas de tratamiento, es preciso desarrollar una estrategia en el diseño de riego. Una consideración clave en el diseño a la hora de utilizar agua de ciudad tratada y desinfectada de manera secundaria, es maximizar la reutilización de agua residual en los meses de invierno, cuando la demanda de agua para los cultivos forrajeros es baja y produce una mínima percolación.

En este estudio se ha trabajado con 27 pivotes centrales situados en Palmdale (California), en los que hubo que rediseñar sus cartas de aspersión para aplicar aproximadamente 7.000 GPM de agua residual tratada. Mediante esfuerzos de diseño innovadores, pruebas extensivas y experimentación de campo, el Departamento Sanitario del Distrito de Los Ángeles adoptó un conjunto emisor que permitiera una aplicación altamente eficiente del agua residual reutilizada sin degradación de las aguas subterráneas a lo largo del año.

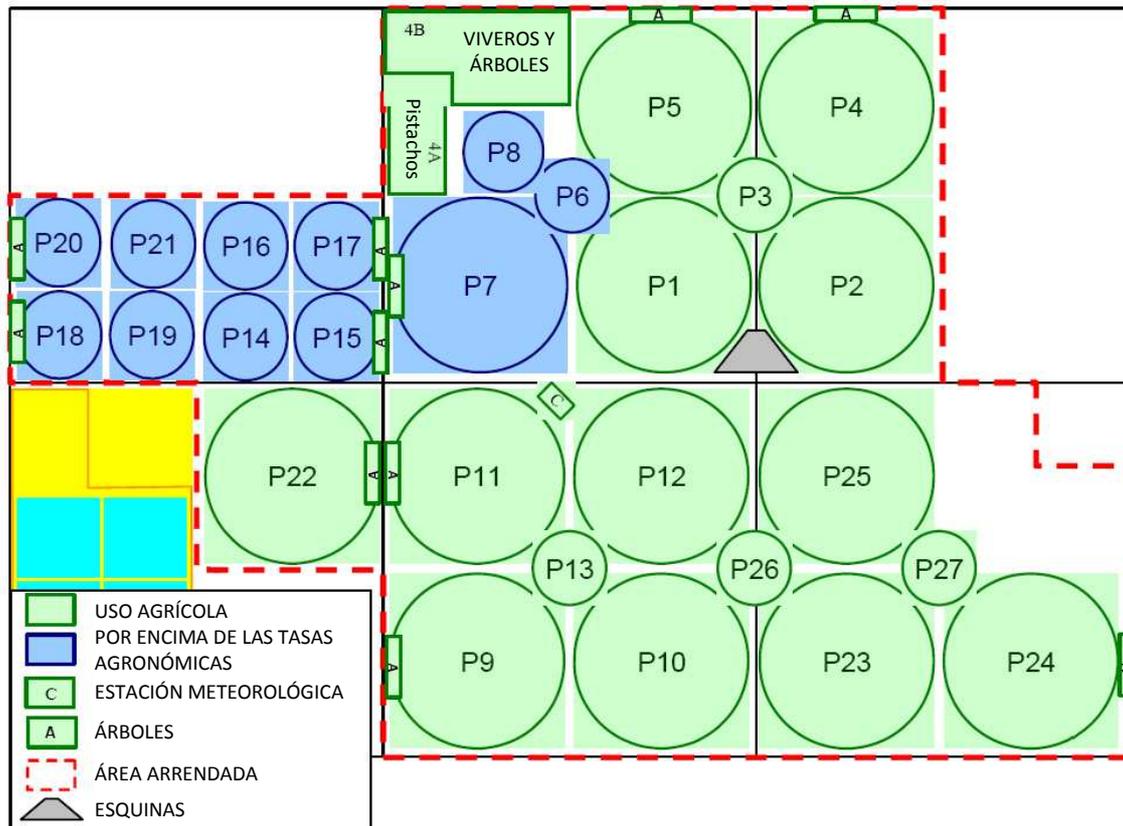
Muchos factores influyeron en la selección del conjunto de componentes de aspersión, entre otros: las tasas de infiltración, las tasas de aplicación, el almacenamiento de humedad en el suelo, la uniformidad de distribución, la regulación de presión, el viento y la acumulación de residuos.

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día en EEUU, muchas localidades utilizan agua regenerada. El agua regenerada es agua residual tratada, típica para usos no potables, como el riego. Históricamente, el agua residual tratada procedente de instalaciones de tratamiento de aguas residuales se descargaba directamente a un río u otra corriente natural de agua. Sin embargo, la demanda continua de reservas de agua dulce ha incrementado la necesidad de reutilizar en riego aguas residuales tratadas. Utilizar agua regenerada para usos no-potables ahorra agua potable para beber, ya que se usa menos agua potable en usos no-potables.

El Departamento Sanitario nº 20 del Distrito de Los Ángeles en Palmdale, California, reutiliza aproximadamente 8,5 millones de galones por día de agua residual tratada de manera secundaria dentro del Emplazamiento de Gestión de Agua Residual de Palmdale para riego. Se ha comprobado que el riego con agua residual es una alternativa viable. Para reutilizar el agua residual de manera beneficiosa, es vital un sistema de aplicación terrestre eficiente y efectiva, con el mínimo impacto medioambiental. Además, la aceptación pública depende de un diseño robusto y fiable y de la estrategia de gestión.

Para alcanzar esos objetivos el Emplazamiento de Gestión de Agua Residual de Palmdale utiliza actualmente 27 Pivotes centrales que riegan 2.000 acres de cultivos forrajeros, un vivero, una plantación de pistacho y 11 líneas de árboles. La siguiente imagen representa un mapa de la distribución de cultivos:



### Uniformidad de distribución (UD)

La uniformidad de distribución es una medida de la uniformidad con que se distribuye el agua de riego a las plantas a lo largo del campo. Se define como:

$$UD_{1q} = \frac{d_{1q}}{D_{media}} = \frac{\text{Altura media del agua recogida en el 25\% del área menos regada}}{\text{Altura media del agua recogida total}}$$

La práctica de utilizar el área del 25% menos regado (bajo cuarto) como referencia estándar ha ganado gran aceptación. La uniformidad descrita por  $UD_{1q}$  (y todos los términos relacionados con el bajo cuarto) deja más o menos un octavo del área a menos del valor del numerador. Si la  $UD_{1q}$  se usa para calcular la profundidad de aplicación bruta, este “bajo-riego” varía de 0 a 1/8 de la profundidad mínima aplicada al extremo. Esta fórmula se puede aplicar a todos los métodos de riego.

Estos son los factores principales que influyen en la UD del Pivote central:

1. Distintas tasas de aplicación a lo largo de la longitud del Pivote. Consecuentemente, las boquillas del aspersor tendrán los tamaños correctos a lo largo del Pivote para adecuarse a la pérdida de presión por fricción en la tubería, al espaciamiento de aspersores y al área a cubrir (la primera torre cubre un área mucho menor que la torre final)
2. Superposición desigual de los patrones de aspersión entre aspersores. Depende del viento, el ángulo de aplicación del aspersor, la limpieza del mecanismo de rotación del aspersor y la altura de los aspersores, todos ellos se consideraron y/o corrigieron como parte de esta evaluación.

- Patrones de aplicación desiguales en diferentes cuadrantes del campo. Esto lo causa principalmente la existencia de patrones de viento desiguales y es especialmente relevante si el Pivot está siempre en el mismo punto en cada momento del día.

Para evaluar correctamente la  $UD_{1q}$  de los Pivotes centrales, el Centro de Investigación y Formación del Riego en la Universidad Estatal Politécnica de California desarrolló un procedimiento de evaluación de riego que contempla todos estos factores.

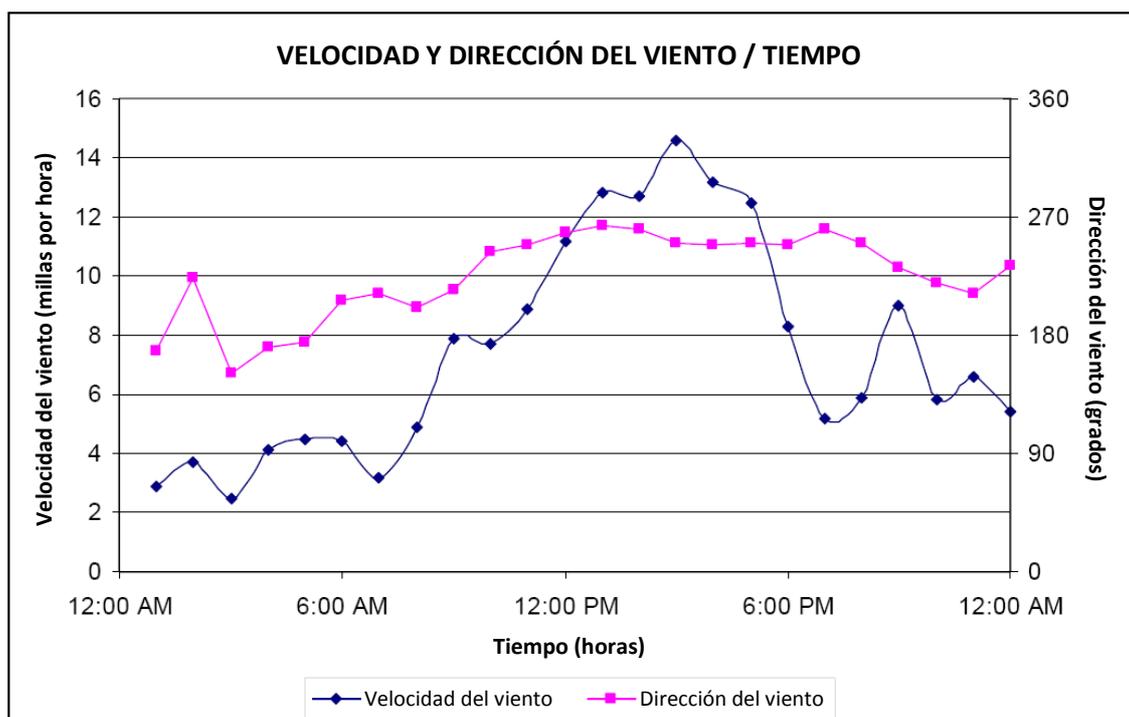
#### Evaluando un Pivot central “representativo”

El Pivot 2 se escogió como el Pivot central “representativo” porque era uno de los primeros Pivotes instalados y la mayoría de las modificaciones (si no todas) hechas en el Pivot 2 fueron necesarias en los demás Pivotes centrales. Además, la carta de aspersión original del sistema estaba operativa y las modificaciones se ajustaban sobre ésta, dentro de la operación del Emplazamiento de Gestión de Agua Residual de Palmdale.

La clave para evaluar de manera efectiva las modificaciones específicas (destacadas en este estudio) practicadas en el Pivot 2 aseguraba que todos los demás (por caudal, presión del sistema, velocidad de la máquina y condiciones de viento) se mantendrían constantes. Todos estos factores se pueden manipular fácilmente y controlar, excepto las condiciones del viento, que pueden variar de minuto a minuto y pueden afectar notablemente a la uniformidad.

#### Efectos del viento en la uniformidad

Para asegurarse de que las condiciones del viento eran tan uniformes como fuera posible en cada examen, se utilizó la estación meteorológica para encontrar posibles patrones de velocidad del viento y dirección. Se analizó la información desde el mes anterior a la evaluación inicial y se hizo un gráfico para identificar tendencias del clima. A continuación se muestra la información sobre la velocidad del viento en un periodo típico de 24 horas.



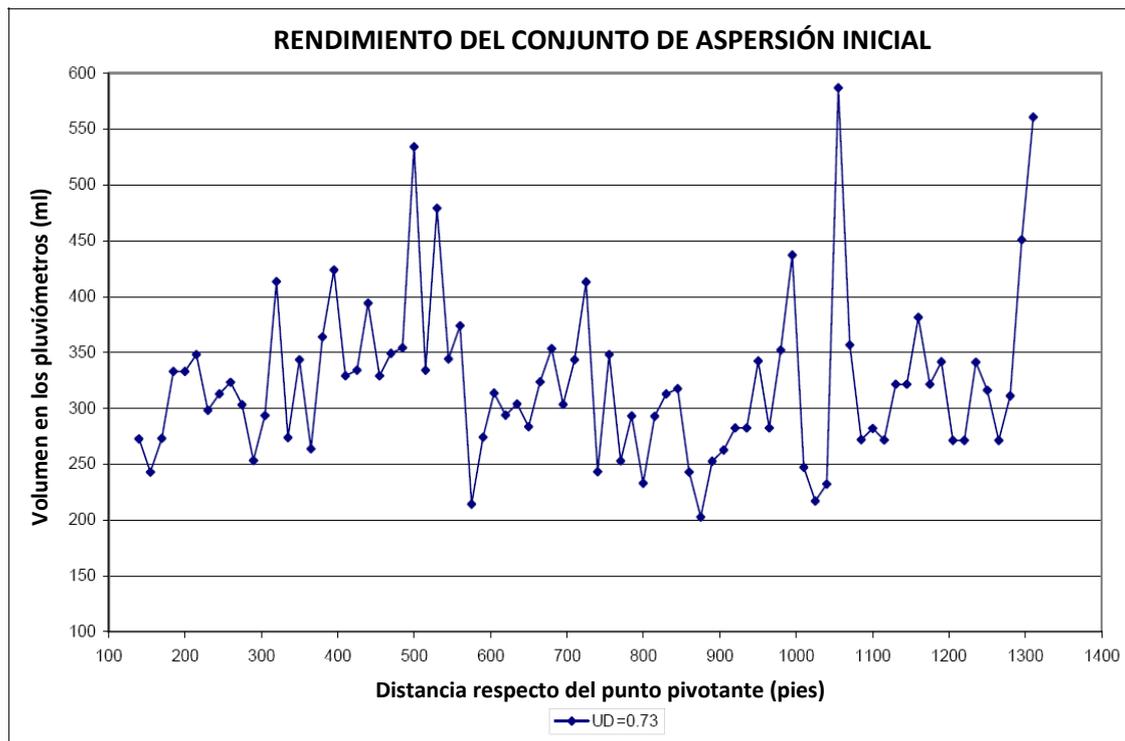
La gráfica muestra cómo el viento tiene una tendencia a incrementar significativamente entre las 9 de la mañana y las 6 de la tarde. Las evaluaciones se llevaron a cabo con una velocidad del viento de entre 3 y 6 millas por hora.

Los test se realizaron con un ángulo de 45° sobre la dirección de viento predominante. Esto permite alcanzar una UD representativa sin tener que desarrollar evaluaciones múltiples en el Pivot central si el viento comenzara a soplar.

Desde que las rotaciones del Pivot central tienden a seguir un ritmo de 12 horas y comienzan típicamente en el mismo momento cada día, el efecto del viento en la uniformidad de distribución en determinados puntos del campo serán siempre los mismos. Por ejemplo, si el viento sopla de manera que un punto del campo no recibe nada de agua, ese punto probablemente no recibirá nada de agua en ninguno de los círculos, o al menos no en todas las demás rotaciones.

### Evaluación inicial de la UD

Antes de hacer ninguna modificación al Pivot central “representativo” se hizo una evaluación de la UD para verificar el diseño de la carta de aspersión del Pivot en el estado actual. Esto dio una buena estimación para los valores de UD que se podían esperar en el Emplazamiento de Gestión de Agua Residual de Palmdale. La UD resultante fue 0,73. La siguiente gráfica ilustra los volúmenes en los pluviómetros según la distancia respecto del punto pivotante.



La UD de la carta de aspersión debería ser 0,90. Para alcanzar ese objetivo hay que implementar una serie de modificaciones en el Pivot central y sus aspersores. Las mejoras se seleccionaron y se comprobaron la reducción de variaciones entre pluviómetros.

### Mejoras/modificaciones en cada Pivot central

Para ofrecer un valor de uniformidad de distribución (UD) posible de obtener y realista, se hicieron las siguientes modificaciones al Pivot 2 (ordenadas por prioridad):

1. Subir los aspersores de una media de 3,5 pies a una media de 5,5 pies.
2. Escalonar las alturas y nivelar los aspersores para evitar que colisionen los chorros de agua.
3. Eliminar la suciedad acumulada entre el motor y el plato para permitir una rotación libre.
4. Limpiar los platos para mejorar la trayectoria del agua.
5. Sustituir los cuerpos de rotator rotos.
6. Cambiar las boquillas para asegurar las tasas de caudal diseñadas durante el test.

Los puntos 1 a 3 fueron las causas fundamentales de la UD sub-par (de 0,73, comparada con una carta de aspersión de diseño de Pivot a un valor de UD objetivo de 0,90)

### Alturas de los aspersores

El espaciamiento de aspersores en los Pivotes centrales se diseña para alcanzar un determinado solapamiento. Este solapamiento asegura una uniformidad de distribución adecuada durante el riego. En años previos, el Distrito se centró en limitar y/o prevenir el desvío de los Pivotes (que se salieran del campo), aflojando muchos aspersores (sobre todo los del final de la máquina) e instalándolos justo por encima de la altura del cultivo, (imagen de abajo). Desafortunadamente, esta medida afectó negativamente la UD del Pivot.



Se consultó al fabricante de los aspersores, Nelson Irrigation, para verificar que la altura de montaje de los aspersores era correcta. El pack original del Pivot 2 usaba Rotator R3000 con platos verdes. Este plato está preparado para funcionar con una presión de 20 a 50 PSI y a una altura de 6 a 9 pies.

Las alturas de los aspersores para el test inicial de UD (antes de las modificaciones) oscilaban de 30" a 48" y tenían una altura media de aspersor de 42" aproximadamente. Esto limitaba el diámetro de lanzamiento y, en última instancia, el solapamiento de cada aspersor. Para corregir esto, se modificaron los aspersores de manera que la altura media era 66" (siguiente imagen); la mitad a 60" y la otra mitad a 72". Antes de aumentar la altura de los aspersores, sin embargo, el Distrito había mitigado los problemas de deriva mediante cloración del agua residual tratada.



Los aspersores Rotator R3000 no se montaron tan altos como recomendaba el fabricante porque el Pivot operaba a 40 PSI y la dispersión por viento sigue siendo una preocupación, incluso ahora que se usan aguas residuales tratadas con cloro. Además, el mantenimiento del aspersor es más difícil colocándolo alto; esto se tratará en una sección posterior.

### Nivelado y escalamiento de los aspersores

Durante la evaluación inicial, los chorros adyacentes de aspersión solían colisionar unos con otros, impactando sobre el efecto de solapamiento (imagen).



Para minimizar el choque de chorros, las alturas de las mangueras bajantes se pueden escalonar. Por ejemplo, un aspersor se instala a 5 pies y los dos adyacentes se configuran a 6 pies. Estos escalonamientos también previenen que los chorros de agua colisionen con los contrapesos, causando el balanceo de los bajantes mientras funcionan.

Como parte de las modificaciones cada uno de los demás aspersores se escalonó verticalmente un pie para minimizar el golpe de los patrones de riego y para minimizar el balanceo de aspersores (imagen).



### **Limpieza de residuos de los Rotator**

En la evaluación inicial se vio un evidente taponamiento parcial de las boquillas y una acumulación de suciedad en los platos. Plásticos, plumas y algas en el agua de riego fueron la causa primaria de este problema. La acumulación de desechos por encima y debajo del plato del Rotator y el taponamiento de boquillas (total o parcial) puede tener un impacto significativo en la uniformidad de distribución del sistema de riego. La suciedad altera el patrón de emisión de la boquilla y dificulta la rotación correcta de los platos. Esto, en definitiva, genera una pobre cobertura de aplicación. En las imágenes se aprecian claramente residuos en las piezas del Rotator.



Como parte de las modificaciones, se quitaron todos los platos para limpiarlos a fondo.



Casi todos los aspersores tenían algas o residuos entre el plato y el rotor, principalmente por un problema de filtración. Por lo tanto, la explotación redujo el intervalo de mantenimiento entre servicio y limpieza de aspersores y filtros.

#### Sustitución de cuerpos de los Rotator

Se tuvieron que cambiar unos 25 cuerpos de Rotator porque estaban agrietados, doblados o rotos. El cuerpo del rotator usado en esta explotación agrícola es el T3000, especial para aguas residuales. La arquitectura con cuerpo abierto permite que la suciedad del agua pase con más facilidad evitando la acumulación de materiales en el plato y el cuerpo del aspersor. Cambiar los cuerpos de Rotator agrietados y rotos fue parte del programa de incremento del mantenimiento.

La mayoría de los cuerpos de Rotator tenían agrietados los brazos que afianzan el rotor y el plato, impidiendo que el chorro de agua golpeará contra el plato correctamente.



#### Nuevas boquillas

El cambio final de la evaluación fue la instalación de nuevas boquillas mediante la carta de aspersión del Pivot realizada por Reinke. Se quitó cada boquilla de cada aspersor sustituyéndolas con las boquillas especificadas en la carta. El cambio de boquillas garantizaba un caudal de aspersión correcto y proporcional en cada punto del Pivot, eliminando cualquier boquilla desgastada o taponada que redujera la UD del sistema.

El pack de aspersión original del Pivot usaba boquillas compensadoras de caudal, en los 6 tramos primeros del Pivot. Los 2 tramos finales usaban la boquilla 3TN (orificios fijos con

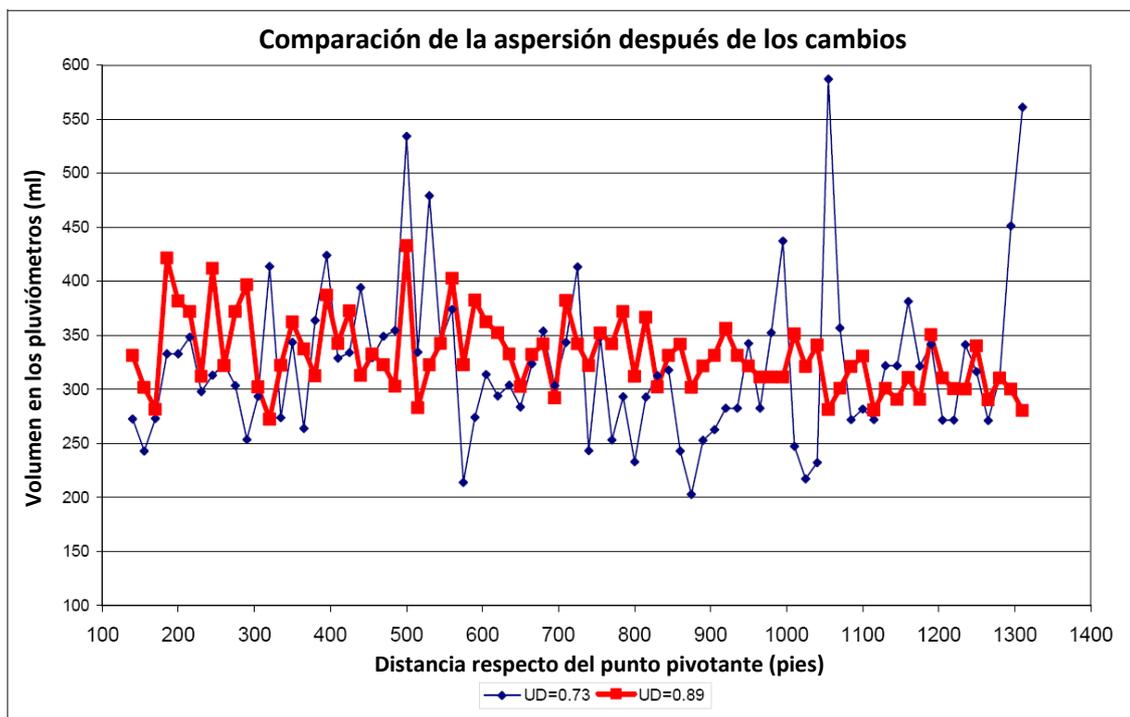
tamaños de perforación calibrados). La boquilla compensadora de caudal usa un orificio flexible, que se contrae a medida que la presión aumenta, permitiendo que la descarga de caudal se mantenga prácticamente constante, sin preocuparse por las fluctuaciones de presión. La naturaleza flexible de la goma también permite la relajación del orificio con baja presión.

Estas boquillas reguladoras están marcadas por caudales (GPM) y las boquillas 3TN están numeradas y codificadas por colores según el tamaño (en medidas de sesenta y cuatroavos de pulgada).

Las boquillas compensadoras de caudal no se recomiendan en bajantes flexibles porque el orificio está cambiando constantemente y el chorro de agua podría no chocar sobre el plato del rotor correctamente. Esto podría tener implicaciones negativas en la UD del sistema por el balanceo en la vida del rotator y el plato. Por este motivo, todas estas boquillas se cambiaron por boquillas 3TN según el nuevo cálculo de carta de aspersión.

### Resultados de las modificaciones

En esta gráfica se muestra una comparación de los volúmenes recogidos en los pluviómetros, antes y después de los cambios. La uniformidad de distribución inicial era de 0,73, la UD tras los cambios pasó a ser de 0,89. Los resultados:



Aunque parece que hay simples cambios entre ambos registros, la diferencia en la UD está relacionada con los puntos de la mitad derecha de la gráfica. Esos puntos, cuando se ponderan, se mejora la UD porque representan una gran porción del campo.

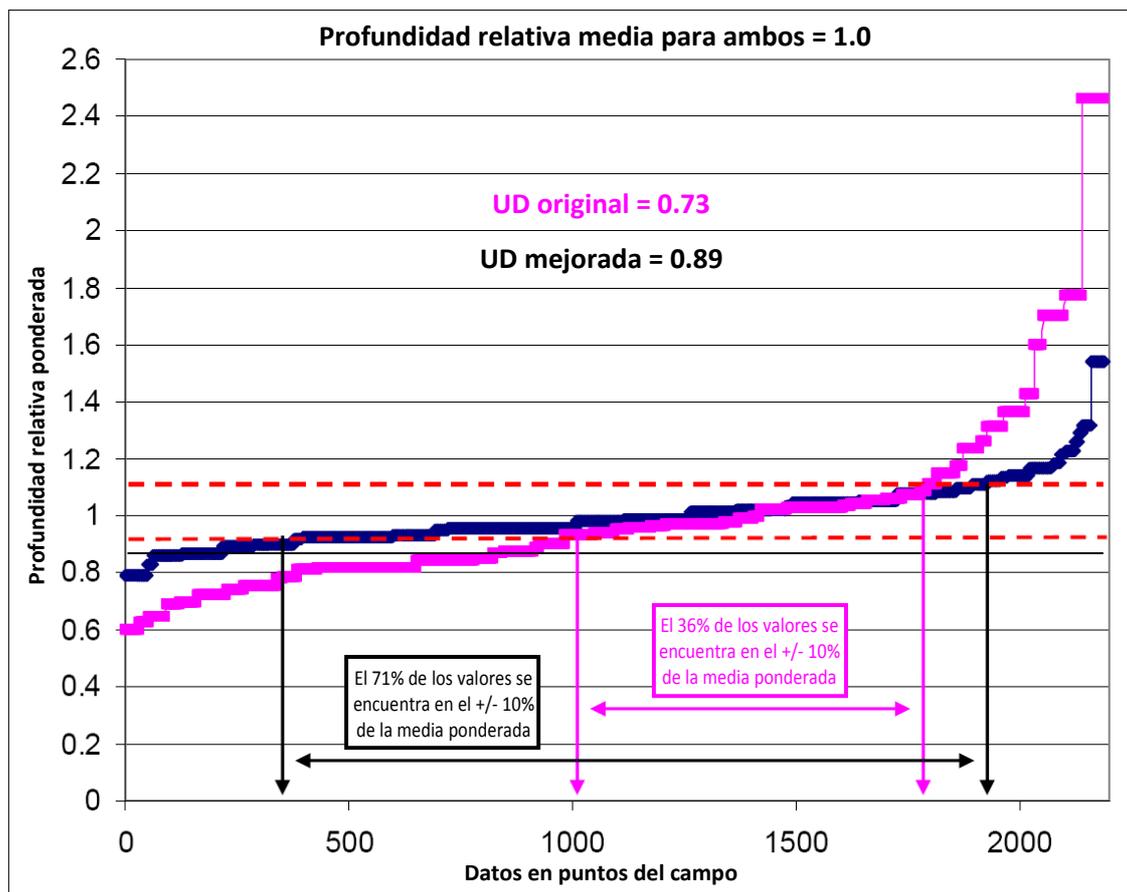
Por este motivo, se demostró que los cambios fueron muy efectivos para mejorar la UD de un Pivote individual, confirmando que es una máquina representativa de todo el campo.

### Comparando los resultados del Pivot central “representativo”

Para comparación, cada uno de los puntos de ambas evaluaciones de UD se ponderaron según la ubicación de la máquina respecto del punto pivotante (los puntos más alejados respecto de la cabeza son más importantes porque cubren un área mayor). Estos puntos se midieron con un valor relativo de 1,0 para mostrar visualmente las diferencias entre ambas evaluaciones.

La siguiente figura ilustra que el número de puntos que caen dentro del intervalo  $\pm 10\%$  de la media ponderada se mejora notablemente a medida que la UD se aproxima a 1. Esto equivale a que:

1. Se mejora la uniformidad de aplicación.
2. Aumenta la eficiencia de riego (asumiendo una programación de riego adecuada) minimizando la profundidad de percolación.
3. La programación de riego es más simple.
4. Hay un incremento en las ubicaciones representativas de muestreo a lo largo del Pivot.
5. Obtenemos más fiabilidad del sensor del suelo porque su ubicación es más representativa.



La gráfica demuestra que, con la carta de aspersión inicial, aproximadamente el 36% del campo es representativo de todo el campo. Sin embargo, incrementando la UD de 0,73 a 0,89 se mejora el segmento representativo del campo hasta un 71%.

Esto simplifica la gestión y operación, al existir una mayor probabilidad de que una muestra de planta o sensor de humedad del suelo se encuentre en una parte representativa del campo.

### **Estandarización de toda la distribución**

Con un valor práctico para una UD obtenible, se hicieron muchos otros cambios para simplificar y sistematizar toda la distribución de los sistemas Pivot centrales.

Estos cambios operacionales incluían la modificación del conjunto de aspersion del Pivot para:

1. Alcanzar las tasas de precipitación (aplicación) para todos los Pivots.
2. Dar una tasa de precipitación que permita trabajar tanto en los meses de invierno como en los de verano, sin escorrentía.
3. Minimizar los requerimientos de presión y reducir costes operacionales.
4. Añadir regulación de la presión para estabilizar la presión que llega a los aspersores.
5. Mantener con mayor facilidad los Pivots y aspersores sin impactar negativamente en la UD.

Todas las mejoras de las operaciones descritas trabajan en correlación con las otras. Para mejorar la operación total del sistema, deben abordarse todos los puntos. Implementarlos individualmente sólo hubiera supuesto beneficios mediocres.

### **Alcanzando las tasas de precipitación con todos los Pivotes centrales**

Un análisis de las tasas de caudal de los Pivots centrales comparadas con los requerimientos de picos de evapotranspiración (ET) para alfalfa, indicó que la mayoría de los Pivots grandes no tenían suficiente caudal.

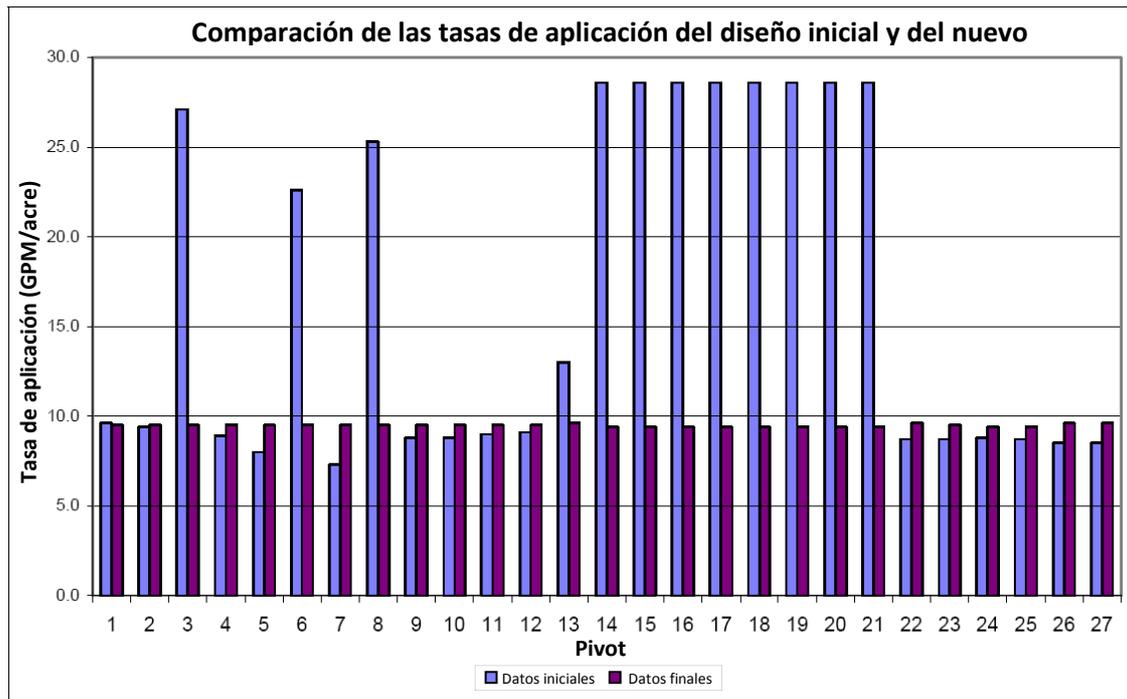
Por otro lado, los Pivots pequeños tenían tasas de aplicación altas, más o menos 3 veces la requerida, dificultando la programación del riego. Los máximos de evapotranspiración para alfalfa regada mediante pivotes centrales varían según la velocidad de trabajo de la máquina.

Por ejemplo, utilizar un Pivot en una rotación de 14 horas supondrá una mayor evaporación porque la superficie de la planta se moja más frecuentemente que usando una rotación de 48 horas. El pico de evapotranspiración estimado para alfalfa en julio en Palmdale, asumiendo una rotación de 24 horas, es de 0,4"/día aproximadamente o 7,5 GPM/acre (940 GPM/125 acres). Después de incorporar una mínima uniformidad de distribución del 0,80, el caudal requerido por el sistema es 0,5"/día o 9,4 GPM/acre (1200 GPM/125 acres) sin bajo-riego.

Para simplificar la gestión del riego todas las cartas de aspersion de los Pivotes se diseñaron con la misma exigencia de 9,5 GPM/acre. De este modo, se aplica la misma profundidad por hora, sin tener en cuenta qué máquina está regando.

La siguiente gráfica muestra que los caudales originales aplicados variaban de 7,3 a 27,3 GPM/acre y el caudal aplicado actual de 9,4 a 9,6 GPM/acre. En la mayoría de los casos el Distrito tuvo que recalcular boquillas en cada Pivot individualmente.

Sin embargo, haciendo correctamente estos cambios se simplificó la operación y planificación de riego para cada Pivot central.



### Un pack para todo el año

Las cartas de aspersión de los Pivots deben soportar los cultivos de verano e invierno sin escorrentía. Esta sería una de las principales tareas. Sin embargo, como la UD es muy buena y los suelos se han clasificado como de arena arcillosa hasta franco-arenosos, las tasas de aplicación no exceden las tasas de infiltración. Estos factores reducen la probabilidad de escorrentía incluso durante los meses de invierno. Además, la instalación de una tasa individual de aplicación simplifica la operación de los Pivotes.

En áreas donde el suelo es algo más pesado (franco-arenoso) se instalaron drops o bajantes en los tramos para incrementar el área mojada (reduciendo las tasas de aplicación instantáneas) sin cambiar las boquillas.



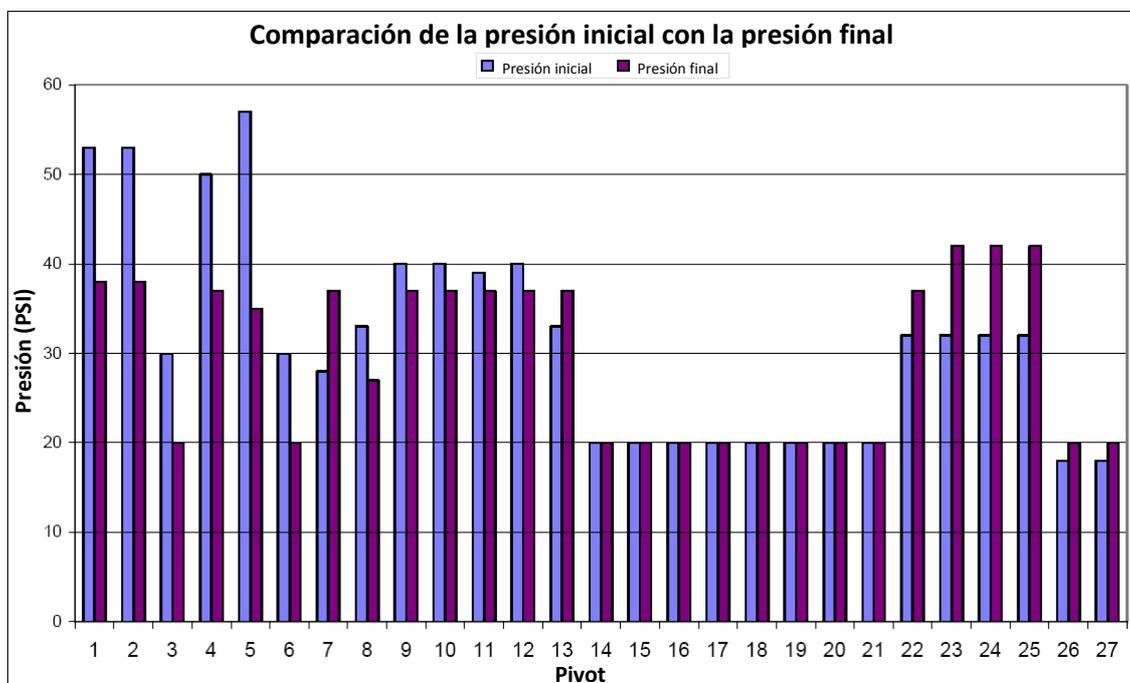
### Presión de operación del Pivot

La presión de la boquilla cercana a la cabeza del Pivot debería estar entre  $\pm 2$  PSI de la presión operacional diseñada. En la mayoría de los casos, las presiones operativas y los caudales

estaban inicialmente por debajo de las recomendaciones de diseño. Durante las evaluaciones de la UD se tuvieron que ajustar muchas válvulas para conseguir que el Pivot central se correspondiera con los caudales y presiones recomendados. Para ello, se tuvo que moderar la conducción hidráulica mediante las válvulas hacia otros Pivotes, provocando que caudal y presión operaran a la mitad de su previsión en el diseño. La práctica de manipular la presión de un Pivot para ajustar otro no podía continuar.

Para reducir las infra-presurizaciones, los conjuntos de aspersión del Pivot se redujeron de 50 a 35 PSI. Esto tiene muchas ventajas, boquillas más grandes que permiten el paso de la suciedad con mayor facilidad y menos corriente de ruptura dado el aumento en el tamaño de la gota, mejorando la capacidad de lucha contra el viento de los aspersores para mantener una UD razonable incluso con fuertes rachas de viento.

La siguiente gráfica muestra cómo se ajustaron las necesidades de presión. Los Pivotes 22 a 25 necesitaban un aumento de presión para compensar el aumento de caudal y el uso de pistolas finales.



### Regulación de la presión

Es difícil programar correctamente los riegos cuando el caudal varía de riego a riego o es distinto al esperado en el momento de programarlos. Para combatir este problema se instalaron reguladores de presión en todos los Pivotes centrales. Los reguladores de presión aseguran que la presión no exceda el límite preestablecido. Sin embargo, esto no garantiza que la presión esté disponible. Además, las bombas de sobrepresión funcionan para proporcionar un poco más de presión de la requerida en los puntos más críticos y los reguladores de presión controlan los requerimientos de presión del diseño en el Pivot central.

Todos los mini-pivotes (por debajo de 700 pies de longitud) tienen reguladores de presión individuales y todos los Pivotes grandes (más de 770 pies de longitud) tienen un único regulador en línea. La decisión de utilizar dos tipos de reguladores se debía a razones de

costes. La imagen siguiente muestra ambos tipos de reguladores. Ambas opciones proporcionaban buenos resultados y ayudaban a estabilizar los caudales en cada parcela.



### Mantenimiento del Pivot central

Una tarea importante en la gestión de la explotación no es sólo disponer de una buena UD, sino mantenerla. Las condiciones inherentes a los residuos del agua residual tratada requieren un mantenimiento regular no sólo en las estaciones de filtrado sino también en los propios Pivotes. Entre cosechas (o por lo menos una vez al mes) los aspersores se limpian a fondo. Para facilitar el mantenimiento, los aspersores se pusieron a una altura media de 4 pies respecto del suelo, de forma escalonada a 3,5 y a 4,5. Esto permite que los operarios puedan limpiar fácilmente los aspersores.

Para salvar esa ligera reducción en la UD causada por las bajas alturas de los aspersores, se cambiaron los platos del Rotator por platos marrones. Los platos de Rotator marrones se sustituyeron por los verdes por las siguientes razones:

- Mayor uniformidad de aplicación (incluso en alturas más bajas).
- 10 chorros de agua en lugar de los 4 del plato verde.
- Trayectorias de chorro variables.
- Impacto más suave en la superficie del suelo.

Además, se instaló una válvula de descarga con un temporizador automático operado con batería al final de casi todas las máquinas para descargar la suciedad final arrastrada del Pivot dos veces al día. Como el proceso es automático la descarga se produce durante el funcionamiento, no al inicio, que era el protocolo habitual.



### Conclusiones

Es importante programar el riego en tiempo real y alcanzar una humedad del suelo monitorizándolo a lo largo del año, porque las demandas del riego fluctúan cada mes y la disponibilidad de agua residual es bastante constante durante todo el año. Por tanto, es fácil que se genere un sobre-riego en los meses de invierno, cuando los cultivos demandan poca agua, y déficit hídrico en los meses de verano, cuando los cultivos requieren más agua. Consiguiendo una alta UD se reduce la posibilidad de percolación profunda en invierno y mejoran las cosechas durante el verano porque el agua de riego se aplica de manera más uniforme en la totalidad del campo.

Los resultados antes y después de las evaluaciones sobre UD en un Pivot central “representativo” muestran que una única máquina, con el equipamiento adecuado y los ajustes precisos, puede alcanzar una UD alta. Sin embargo, era necesario estandarizar toda la explotación, para operar fácil y uniformemente todos los Pivotes. Para conseguirlo, había que armonizar todas las tasas de precipitación, se requería una única tasa de aplicación para todo el año, se tuvieron que ajustar los requerimientos de presión y regular la presión, e incluso se estableció un programa de mantenimiento frecuente para que las altas distribuciones de uniformidad perduraran.

Todos los ajustes operacionales descritos en este estudio tenían que trabajar en correlación con los otros. Para mejorar las operaciones del sistema en su totalidad, todo el sistema debe examinarse y hay que tener en cuenta todos los factores. Implementar sólo alguno de los cambios de manera individual habría generado beneficios pequeños e inapreciables.