

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EVALUACIÓN DE PIVOT CENTRALES EN URUGUAY

por

Sofía CALERO DIEPPA  
Adrian BÁLSAMO BACINO

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2018

Tesis aprobada por:

Director:

-----  
Ing. Agr. Dr. Claudio García Gallareta

-----  
Ing. Agr. Mag. Pablo Morales Molina

-----  
Ing. Agr. Dr. José María Tarjuelo Martín- Benito

Fecha: 5 de marzo de 2018

Autores:

-----  
Sofía Calero Dieppa

-----  
Adrian Bálsamo Bacino

## AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Agronomía que fue nuestra casa de estudio por 5 años y nos regalo amigos, conocimientos y una carrera maravillosa.

A INIA por facilitarnos los medios para realizar este trabajo.

A nuestros tutores Claudio y Pablo, gracias por su paciencia, dedicación, motivación, confianza y aliento, por hacer fácil lo difícil. Fue un privilegio contar con su guía y ayuda.

A los productores que desinteresadamente nos abrieron las puertas de sus establecimientos y nos permitieron llevar adelante la práctica de este trabajo.

A Sully Toledo y el equipo de biblioteca por la excelente disposición ante nuestros pedidos y ocurrencias.

A nuestros amigos que nos apoyaron desde el primer día, que entendieron nuestras ausencias y malos momentos, que a pesar de la distancia siempre estuvieron a nuestro lado. En especial a Silvi, Feli y Diego que fueron nuestros hermanos en los últimos dos años.

Todo esto no hubiera sido posible sin el respaldo incondicional y el cariño de nuestras familias, que tuvieron en primer lugar el trabajo de formarnos como personas, para durante estos 5 años caminar a nuestro lado en nuestra formación como profesionales. Hoy tenemos la alegría de decir que fuimos adoptados por la familia del otro como si fuéramos propios, y ese es el regalo más grande.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	3
2.1. EL DESARROLLO DEL RIEGO EN EL URUGUAY.....	3
2.2. EL RIEGO CON PIVOT CENTRAL.....	4
2.3. UNIFORMIDAD DE APLICACIÓN Y EFICIENCIA DE APLICACIÓN EN PIVOT CENTRAL.....	4
2.4. EMISORES UTILIZADOS EN LOS PIVOT CENTRAL.....	7
2.5. PLUVIOMETRÍA APLICADA POR LOS EQUIPOS PIVOT CENTRAL.....	8
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	10
3.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS EVALUADOS.....	10
3.2. EVALUACIÓN DE CAMPO DE LOS PIVOT CENTRALES....	11
3.3. VARIABLES Y PARÁMETROS CALCULADOS.....	14
3.3.1. <u>Uniformidad de distribución (UD)</u> .....	14
3.3.2. <u>Coefficiente de Uniformidad de Heermann y Hein (CUh)</u> .....	14
3.3.3. <u>Coefficiente de variación (CUv)</u> .....	15
3.3.4. <u>Lámina ponderada de las cantidades recogidas (LMR o AMR)</u>	16
3.3.5. <u>Pluviometría media y máxima en el lateral</u> .....	16
3.3.5.1. Pluviometría media del lateral ( $P_M$ ).....	16
3.3.5.2. Pluviometría máxima en el extremo del lateral ( $P_m$ )....	17
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	18
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	38

6. <u>RESUMEN</u> .....	40
7. <u>SUMMARY</u> .....	41
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	42

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características técnicas de los pivot centrales evaluados .....	11
2. Presiones de trabajo .....	18
3. Velocidad de avance, ancho de mojado y pluviometría máxima .....	20
4. Láminas aplicadas y recogidas .....	21
5. Parámetros estadísticos de uniformidad de riego.....	23
6. Distribución del área evaluada por equipo en áreas infra, supra y bien regada .....	25
7. CU <sub>h</sub> y UD por tramo (PC2).....	30
Figura No.	
1. Ubicación de los equipos evaluados .....	10
2. Esquematización de evaluación de un pivot central .....	12
3. AMR en función de la superficie (PC1.1) .....	27
4. AMR en función de la superficie (PC1.2) .....	28
5. AMR en función de la superficie (PC2) .....	29
6. AMR en función de la superficie (PC3.1) .....	31
7. AMR en función de la superficie (PC3.3) .....	31
8. AMR en función de la superficie (PC3.5) .....	32
9. AMR en función de la superficie (PC3.2) .....	33
10. AMR en función de la superficie (PC3.4) .....	33
11. AMR en función de la superficie (PC3.6) .....	34
12. Coeficiente de Heermann y Hein con y sin cañón .....	34
13. AMR en función de la superficie (PC 4) .....	35
14. AMR en función de la distancia (PC4) .....	36
15. Perfil de altimetría PC4.....	36

## 1. INTRODUCCIÓN

La población mundial creció de poco más de 1600 millones de personas a inicios del siglo veinte a más de 7000 millones en la actualidad, y se prevé un aumento de 85 millones de personas por año hasta el año 2050. Este aumento de población trajo consigo un aumento en la demanda de alimentos, fundamentalmente granos para consumo directo y alimentación animal. El aumento de producción de granos en el siglo veinte tuvo dos fases, una primera basada en la expansión en área y con relativa baja productividad por unidad de superficie, y una segunda etapa asociada a la intensificación agrícola mediante el aumento en la utilización de insumos (maquinaria, agroquímicos) y la incorporación de cultivares de alto potencial de producción. En el aumento futuro de la demanda de alimentos la agricultura bajo riego jugará un rol fundamental, ya que el aumento de producción en base a la expansión en área procurando hacer un uso conservacionista del medio ambiente está llegando a su límite.

A partir de los años 2000 el aumento del precio de los “commodities” provocó en Uruguay un aumento exponencial del área de siembra de cultivos, trayendo aparejado un aumento en la demanda de agua por unidad de área. En respuesta a este cambio de escenario es que se incorporan los equipos pivot central como alternativa de riego, aumentando de 16 a 467 equipos en los últimos 10 años, ocupando en la actualidad un área de 43850 ha.<sup>1</sup>

La inclusión de riego permite no solo acercarse a los rendimientos potenciales de los cultivos en condiciones óptimas de producción (fecha de siembra, fertilización, control de plagas, enfermedades y malezas), sino también estabilizar la producción a lo largo de los años independizándola del régimen hídrico, muy variable en las condiciones del Uruguay.

Los equipos pivot central fueron diseñados originalmente para climas áridos o semiáridos, con suelos livianos o medios a livianos, condiciones totalmente opuestas al ambiente productivo del Uruguay. Por esta razón este trabajo tiene como objetivo general identificar problemas de uniformidad en los equipos de riego pivot central para las condiciones de Uruguay y conocer por qué se generan, además de determinar parámetros de uniformidad de aplicación que determinen o no el buen funcionamiento de los equipos y medir las láminas de riego aplicadas bajo las condiciones normales de operación para compararlas con la lámina de diseño.

---

<sup>1</sup> Morales, P. 2017. Com. personal.

La uniformidad de aplicación de los equipos condiciona el consumo de agua y energía, allí radica la importancia de realizar evaluaciones estandarizadas para optimizar su uso e implementar medidas de eficiencia energética. El correcto desarrollo de un proyecto y plan de riego debería incluir la realización de evaluaciones de este tipo para disminuir las diferencias entre el volumen de agua que se desea aplicar y el aplicado, identificar problemas que puedan ser reparados o elementos que deban ser sustituidos, optimizar el sistema de bombeo y reducir el consumo de energía.

En este marco se evaluaron cuatro pivot centrales en diferentes sistemas de producción para tener una aproximación del funcionamiento de los mismos en condiciones comerciales.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. EL DESARROLLO DEL RIEGO EN EL URUGUAY

La tecnología del riego en Uruguay surge no solo como instrumento para aumentar la producción, sino también como una herramienta de relevante importancia para atenuar riesgos y lograr cierta estabilidad en la economía de los productores (Bachino, 2012).

La utilización del riego en la agricultura del Uruguay ha registrado un crecimiento importante en la última década, en un contexto en que los cultivos que tradicionalmente se producen bajo riego (arroz, frutas, y hortalizas) han estabilizado su crecimiento. Por lo tanto, la principal fuerza en la expansión del riego la vienen ejerciendo ciertos cultivos de verano que tradicionalmente se realizan en seco, como soja, maíz, sorgo, y algunas pasturas como alfalfa, lotus, trébol, y festuca (Rosas et al., 2014). A pesar de que la superficie bajo riego en Uruguay ha crecido en los últimos años, aún se encuentra muy lejos de la superficie potencial de riego que se estima en 1.760.000 ha (FAO, s.f.) y del total del área sembrada de cultivos de verano y pasturas (Morales et al., 2014).

El desarrollo del riego suplementario en cultivos y pasturas concebido como una herramienta integral dentro de los distintos sistemas productivos de Uruguay, se evidencia como una de las tecnologías más promisorias en el impulso de una nueva etapa de desarrollo agropecuario (GDR, 2010).

El incremento del precio de la tierra, de los insumos y de los productos agropecuarios han sido determinantes para hacer rentable la inclusión del riego en los sistemas de producción agrícolas, lecheros y agrícola- ganaderos intensivos. Sin embargo, este crecimiento en las áreas regadas no ha sido acompañado en similar medida por la formación de técnicos y productores en los conceptos básicos para el diseño y la operación del riego. En efecto, en cualquier recorrida por predios con riego es muy frecuente observar equipos mal diseñados o mal operados, desconocimiento de la capacidad de almacenamiento del suelo, desconocimiento de las dosis de riego que se están aplicando, frecuencias de riego que no toman en cuenta el consumo del cultivo, etc., todo lo cual se traduce en muy bajas eficiencias del riego, y por lo tanto una respuesta muy marginal de los cultivos (García Petillo, 2012).

## 2.2. EL RIEGO CON PIVOT CENTRAL

Un pivot central es un ramal de riego con un extremo fijo, por el que recibe el agua y la energía eléctrica y otro móvil que describe un círculo girando sobre el primero, caracterizándose porque se mueve mientras riega. Está formado por una tubería portaemisores que va sustentada sobre torres automotrices, dotadas normalmente de un motor eléctrico y dos ruedas neumáticas. Cada tramo va unido a una torre soporte y articulado con el tramo anterior, debiendo permitir giros según un eje vertical y otro horizontal (Tarjuelo, 1995).

Como principales ventajas de los equipos pivot se destacan la facilidad de regar grandes superficies, economía en mano de obra y relativo bajo costo energético de funcionamiento, versatilidad para ser utilizado en diferentes condiciones de suelo, clima y cultivo, posibilidad de aplicar láminas diferenciadas de agua acordes a las reales necesidades del cultivo, mayor rendimiento de los cultivos, seguridad de cosecha, mayor eficiencia en el uso del agua, consumo racional de energía y agroquímicos, fácil automatización, alta frecuencia de aplicación, adaptación en terrenos que difícilmente podrían ser regados por otros métodos, alta uniformidad de riego aún funcionando en condiciones de viento y menor costo de inversión por hectárea regada (Allen et al., citados por Rodríguez y Troncoso 2005, Morales et al. 2014, Mujica et al. 2014, Morábito et al. 2015).

## 2.3. UNIFORMIDAD DE APLICACIÓN Y EFICIENCIA DE APLICACIÓN EN PIVOT CENTRAL

Es importante optimizar los sistemas de riego, ajustando la aplicación de agua a los requerimientos de agua del cultivo (Clemmens y Dedrick, 1994). El mejoramiento de la eficiencia de los sistemas de riego es un tema prioritario para la mayoría de los países del mundo, donde se plantea que este es un factor importante para el aprovechamiento óptimo de los recursos hídricos en función de potenciar los rendimientos y contribuir a la seguridad de la alimentación de los pueblos (Madramootoo y Fyles, 2010). Los pivot centrales son una interesante opción de riego, ya que su rendimiento puede ser muy alto (Clemmens y Dedrick, 1994).

La evaluación en campo de un sistema de riego por aspersión, permite determinar su eficiencia de aplicación de agua, que está relacionada con la uniformidad de aplicación del agua y engloba las pérdidas del sistema (Keller y Bliesner, citados por Naroua et al., 2012).

Según Louie y Selker (2000) la uniformidad de aplicación es muy importante para la optimización del consumo de agua y de la energía, permitiendo obtener adecuados rendimientos de los cultivos, minimizando el impacto ambiental por excesos de agua aplicada en los sistemas con baja uniformidad de aplicación.

Dechmi y Playán (2000) indican que la uniformidad de distribución del agua en los sistemas de aspersión es necesaria para un uso más eficiente del agua disponible, y que, además un riego eficiente permite maximizar la producción y limitar las pérdidas por percolación profunda.

Según Tornés et al. (2009), Bernardo et al., citados por Sandri y de Andrade (2009), Mena et al. (2010), Ortíz et al. (2010a), Morábito et al. (2015), valores de  $CU_h$  de 80- 85 % en riegos individuales con pivot central pueden ser suficientes para alcanzar una buena uniformidad de producción, ya que el correspondiente  $CU_h$  del agua en el suelo puede superar fácilmente el 90 %. Cárdenas, citado por Jiménez et al. (2010) plantea que la uniformidad de aplicación del riego es un parámetro que está muy relacionado con la eficiencia del riego y con la producción de los cultivos. Por tanto, la evaluación técnica de un pivot central considera, entre otros aspectos, la determinación de los coeficientes que reflejan la calidad del riego y que se asocian a la uniformidad del cultivo en el proceso de aplicación de agua (Rodríguez y Troncoso, 2005). De acuerdo a estos resultados,  $CU_h$  de riegos individuales superiores al 90% no incrementan en forma significativa la uniformidad del agua en el suelo, ni la producción final del cultivo (Ortíz et al., 2010b).

El coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein ( $CU_h$ ) es sólo un factor en la evaluación del rendimiento total del sistema. Las tasas de aplicación, la escorrentía, el viento, la cantidad de agua aplicada, la bomba y la gestión general del sistema pueden afectar en gran medida el rendimiento de los sistemas de riego (ASAE, 2001).

De acuerdo con Bernardo et al., citados por Sandri y de Andrade (2009), Mena et al. (2010) una uniformidad de distribución (UD) de 70% indica buen funcionamiento del equipo.

Un sistema que opere con un coeficiente de uniformidad menor que el valor de diseño puede estar indicando emisores desgastados o rotos, o un mal funcionamiento general. No obstante, con una buena uniformidad como con otra no tan buena se pueden alcanzar altas producciones, la diferencia está en la cantidad de agua necesaria para ello, siendo claramente menor cuanto mayor sea la uniformidad. También serán menores las zonas del cultivo con déficit de humedad y percolación (Morábito et al., 2015). La reducción de la uniformidad del riego causa, entre otros problemas, zonas con un exceso de agua y lixiviación de nitratos y otros productos agroquímicos (Ortega et al., 2004).

Las diferencias entre los valores de  $CU_h$  y UD ponen de manifiesto que ambos parámetros ofrecen una información complementaria, siendo más sensible a la

variabilidad la UD (Ortíz et al., 2010a).

El gran número de factores que influyen en la uniformidad del riego pueden generalmente agruparse como sigue: el diseño del sistema de riego, las condiciones operativas y la gestión (Ortega et al., 2004). De acuerdo con Heinemann et al. (1998), los factores que afectan la uniformidad de distribución del agua son los climáticos (evaporación, temperatura del aire, humedad relativa y condiciones locales del viento) y los factores no climáticos, relacionados al equipo de riego (presión de operación del emisor, velocidad y alineación de las torres y altura del emisor).

No se han encontrado diferencias significativas en la uniformidad de reparto por factores tales como: tamaño del equipo, velocidad y dirección del viento, aunque los equipos pequeños (menores a 10 ha) son más afectados por el viento, sobre todo cuando este sopla en la misma dirección del lateral (Tarjuelo et al., 2014).

Tarjuelo (1995), Heinemann et al. (1998), Dechmi y Playán (2000), plantean la reducción de la altura del emisor al suelo, para disminuir las pérdidas por evaporación y arrastre (PEA), sin perjudicar los parámetros de calidad de riego. Sin embargo, Faci et al. (2001) plantean que la situación del emisor a menor altura reduce la anchura mojada y aumenta la pluviometría, lo cual puede causar problemas de escorrentía en suelos con baja tasa de infiltración.

Tarjuelo (1995) indica que normalmente el área regada adecuadamente (ARA) es el área de la parcela de cultivo que permite satisfacer la evapotranspiración máxima del cultivo con la lámina infiltrada. No significa que siempre que haya un parámetro de uniformidad de riego alto ( $CU_h$ ,  $CU_v$  y UD), el ARA es también alto o viceversa, aunque si existe buena correlación entre los parámetros (Jiménez et al., 2012).

Existen contradicciones entre los valores de  $CU_h$ ,  $CU_v$  y UD calculados y el ARA, donde es mayor el ARA para  $CU_h$ ,  $CU_v$  y UD menores y viceversa. Esto está asociado a la distribución de la lámina de agua en la máquina de riego. Si existe una mala distribución de agua en los tramos cercanos al centro del pivot, la afectación del ARA es menor, pero si los problemas de distribución están alejados del centro del pivot, ocurre lo contrario, es decir la afectación del ARA es mayor. Esto se debe a que los tramos cercanos al centro de rotación de la máquina no son representativos con respecto al área total de riego, sin embargo los tramos lejanos si (Jiménez et al., 2010).

Jiménez et al. (2010) encontraron que existen asociaciones elevadas entre el ARA y los parámetros  $CU_h$ , y  $CU_v$  respectivamente. Sin embargo, la UD tiene poca influencia en el ARA porque este indicador representa el 25% de los valores más bajos, y precisamente estos no se tienen en cuenta para el cálculo del ARA.

Si el tramo del lateral que está aplicando el agua con alta variabilidad, está cercano al centro del pivot, el ARA será mayor, y mientras más alejado esté el tramo que distribuye mal el agua, será menor el ARA, por tanto, se impone estudiar la uniformidad por tramos (Jiménez et al., 2012). Por este motivo sugieren que el coeficiente de uniformidad no debe ser el indicador que rijan la calidad de distribución de agua en la máquina de riego de pivot central, sino el porcentaje de área regada adecuadamente.

Tarjuelo, citado por Jiménez et al. (2010) propone un criterio de clasificación del área regada según el porcentaje de área regada adecuadamente (ARA) donde área muy bien regada (MBR) se corresponde con un ARA mayor al 66%, área bien regada (BR) con ARA entre 57 y 66% y área inadecuadamente regada (IR) con ARA menor al 57%.

#### 2.4. EMISORES UTILIZADOS EN LOS PIVOT CENTRALES

Los aspersores más modernos que se utilizan en los equipos pivot en las últimas décadas tratan de conseguir una gran proporción de tamaños de gota medio (entre 1,5 y 4 mm de diámetro) y un buen alcance (de 8 a 12 m, o más), trabajando a baja presión (menos de 200 kPa, Tarjuelo, citado por Ortíz et al., 2010b). Estos tienen además la gran ventaja de permitir variar la altura de instalación respecto al suelo, lo que puede ayudar a reducir las pérdidas por evaporación y arrastre, manteniendo una buena uniformidad de aplicación del agua (Solomon et al., 1985).

En contraposición a lo que indica Tarjuelo et al. (2014), al comparar boquillas Rotator y boquillas de spray en pivot centrales, Hanson y Orloff (1996) encontraron que las boquillas Rotator son las que logran mayor uniformidad de aplicación. Bajo condiciones de viento la uniformidad de aplicación aumenta para boquillas spray y disminuye para las Rotator. Modificaciones en la separación de los emisores son recomendadas cuando se usan boquillas Rotator.

Según Morales et al. (2014) el conocimiento de la uniformidad de aplicación y de las láminas de riego aplicadas es de suma importancia, ya que ambos parámetros permiten evaluar el funcionamiento de los equipos y el manejo del riego respectivamente.

Los pivot centrales son equipos que pueden alcanzar altas uniformidades de aplicación si se obtiene una adecuada combinación entre el diseño y operación de los mismos. Un manejo incorrecto de los equipos debido a su operación con presiones por

debajo de las requeridas y un mal mantenimiento de los emisores repercuten directamente en la uniformidad de aplicación y en la uniformidad de distribución; por consiguiente se obtendrá una baja eficiencia de aplicación impidiendo alcanzar el potencial de diseño de estos equipos (Morales et al., 2014).

## 2.5. PLUVIOMETRÍA APLICADA POR LOS EQUIPOS PIVOT CENTRAL

En los riegos a presión no se acostumbra a medir láminas infiltradas, sino que en aspersión son sustituidas por las pluviometrías medias y máximas (García Petillo, 2010).

Los equipos pivot central tienen una pluviometría de descarga diferencial a lo largo de los tramos, aumentando su valor a medida que se aleja del centro del pivot, porque el tiempo de aplicación de agua a un punto del terreno va siendo cada vez menor a medida que nos alejamos del centro del equipo y todos los puntos tienen que recibir la misma cantidad de agua (Tarjuelo, 1995).

La pluviometría aplicada por los pivot centrales es un parámetro importante que se debe considerar a la hora de realizar el diseño de los equipos, a efectos de evitar problemas de escurrimiento y de erosión del suelo durante la aplicación del riego.

García Petillo (2010) indica que la pluviometría máxima descargada por un pivot central es mayor cuanto mayor sea la longitud de la tubería y cuanto menor sea el diámetro mojado por los emisores. En los pivot modernos, cuya longitud generalmente no es inferior a los 400m, que utilizan como emisores toberas pulverizadoras que mojan diámetros de 6 a 12m, la precipitación instantánea en el extremo suele ser mayor a los 150 mm/h. Por supuesto que en estos casos siempre se supera la velocidad de infiltración del suelo, por lo que la existencia o no de escurrimiento está relacionada fundamentalmente con la capacidad de almacenar agua en la superficie del mismo. Esta capacidad depende fundamentalmente de la pendiente general de la parcela a regar, de la microtopografía o rugosidad de la superficie y de la textura del suelo.

Tarjuelo (1995) encontró que los valores de pluviometría máxima pueden variar en el extremo del equipo desde 40 a 155 mm/h.

Morales et al. (2014), evaluando 122 equipos en Uruguay, indican que si bien no obtuvieron un buen ajuste con el modelo lineal ( $R^2 = 0,52$ ) observaron una tendencia de aumento de la pluviometría media en el extremo con el largo del lateral. Los pivot centrales de menor longitud (400 a 560 m) presentaron las menores pluviometrías con valores de 40 a 88 mm/h, y los equipos de mayor longitud (600 a 800 m) presentaron las mayores pluviometrías con valores de 100 a 120 mm/h.

Cruz et al. (2012) determinaron una pluviometría máxima en el extremo de 131 mm/h en un equipo de 360 m de largo.

García Petillo (2010), Morales et al. (2014) coinciden en que en las condiciones predominantes del Uruguay, con pendientes mayores al 3% y suelos francos a arcillosos, la dosis máxima de riego posible de ser aplicada sin que se produzca escurrimiento es muy limitada, debido a la baja capacidad de infiltración que presentan los suelos del Uruguay. Víctora et al. (1999) encontraron que para 12 suelos del Uruguay la velocidad de infiltración promedio es de 8 mm/h. Como solución a esta situación, Faci et al. (2001) proponen aumentar la altura del emisor para aumentar el ancho de mojado y disminuir la pluviometría para reducir los problemas de escorrentía en suelos con baja tasa de infiltración. Morábito et al. (2015), también observaron escurrimiento superficial en el área perimetral de los pivot y propone como solución para disminuir la pluviometría del extremo, aumentar el ancho mojado por el emisor, ya sea cambiando el tipo de emisor o localizando los existentes sobre unos pequeños tubos horizontales (tipo “booms”) dispuestos perpendicularmente al pivot.

En Uruguay no es recomendable el uso de pivot centrales con altas pluviometrías de aplicación debido a la topografía ondulada de los terrenos con pendientes medias de 3% y a la existencia de suelos de textura pesada con bajas velocidades de infiltración que toleran bajas intensidad de aplicación (Morales et al., 2014).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de trabajo consistió en dos etapas, en una primera etapa se realizaron las evaluaciones a campo de cuatro equipos pivot centrales entre diciembre de 2016 y marzo de 2017. En la segunda etapa se calcularon diferentes parámetros a partir de los datos de campo recolectados en cada evaluación.

#### 3.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS EVALUADOS

Se seleccionaron 4 equipos pivot centrales en función de las características de las máquinas de riego: largo de lateral, modelo de equipo y tipo de emisor utilizado. El pivot número uno (PC1) se ubica en la localidad de Kiyú, San José. El pivot número dos (PC2) se ubica en Colonia Valdense, Colonia. El tercer equipo (PC3) es un pivot experimental del SUL (Secretariado Uruguayo de Lana) localizado en Cerro Colorado, Florida. Cabe destacar que este es el único equipo hidráulico de los cuatro evaluados. El cuarto pivot (PC4) está ubicado en la localidad de Goñi, Durazno. La figura No. 1 muestra la ubicación de los equipos.

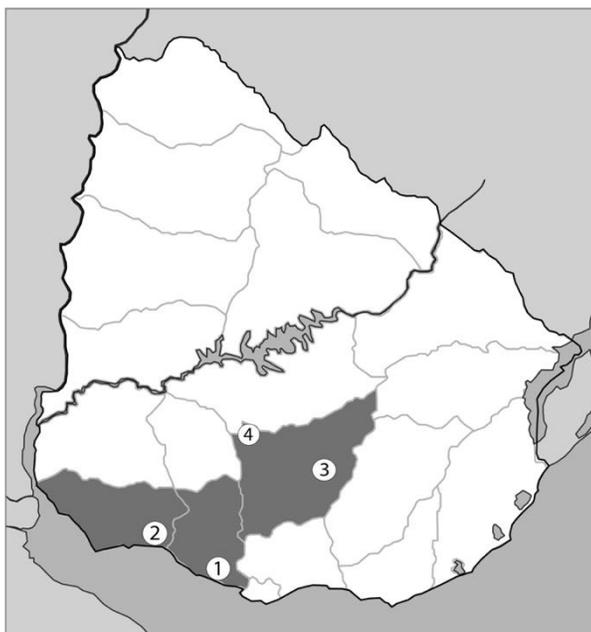


Figura No. 1. Ubicación de los equipos evaluados

En el cuadro No. 1 se presentan las principales características de los equipos evaluados.

Cuadro No. 1. Características técnicas de los pivot centrales evaluados

	PC1	PC2	PC3	PC4
Marca	Valley	Reinke	Valley	Valley
Largo (m)	249	397	88	370
Cañón	No	No	Si	No
No. de torres	4+ alero	8+ alero	1+ alero	6+ alero
Emisores	I- wobbler	Rotator	Spinner	I- wobbler
Separación emisores (m)	1,5	2,0	2.4	2
Altura emisores (m)	2,2	2,2	2,1	2,5
Caudal bomba (m <sup>3</sup> /h)	80	200	50	324
Área regada (ha)	20	48	4,3	44,5

### 3.2. EVALUACIÓN DE CAMPO DE LOS PIVOT CENTRALES

Para realizar las pruebas de evaluación de uniformidad de distribución de agua se utilizó la metodología planteada por la norma ANSI/ASAE S436.1 junio 1996 desarrollada por la Asociación de Riego y el Comité de Riego de la American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Se colocaron pluviómetros de 20 cm de diámetro uniformemente distribuidos (3 y 1,5 m para los equipos 1, 2, 4 y 3 respectivamente) en una línea formando un radio ubicado en tresbolillo a lo largo del lateral del equipo como se indica en la figura No. 2. Se evitó la colocación de pluviómetros hasta en el 20% de la longitud adyacente al centro del pivot en algunas evaluaciones, ya que no provocaría efectos adversos en la evaluación (Tarjuelo, 1995).

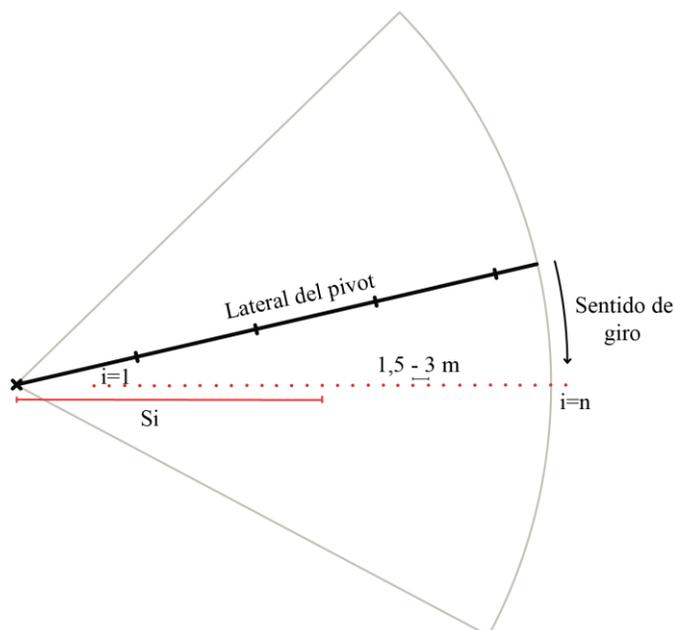


Figura No. 2. Esquemática de evaluación de un pivote central

Para realizar las pruebas de evaluación se seleccionó un lugar representativo de la parcela donde se ubica cada equipo. Previo al comienzo del riego se colocaron manómetros en el extremo del pivote, cerca del centro (si el equipo no contaba con uno propio) y en alguna de las torres intermedias para medir la presión a la entrada del equipo y a lo largo del lateral.

Al comenzar la prueba se realizó el perfil de altimetría en el mismo radio donde se colocaron los pluviómetros para realizar la evaluación. Se utilizó un nivel taquímetro automático para determinar la pendiente y las diferencias de cota a lo largo del equipo. Este procedimiento no se realizó en la evaluación 1 del equipo 1 ni en las evaluaciones 1 y 2 del equipo 3. Con un anemómetro portátil se midió la velocidad del viento, humedad relativa y temperatura.

Se midió la velocidad media de desplazamiento de la última torre con una cinta métrica, cronometrando el tiempo en el que la última rueda del equipo recorría 10 metros.

También con cinta métrica se midió el ancho de mojado como la máxima distancia a la que se emite agua en sentido perpendicular al largo del equipo debajo de los emisores próximos al extremo distal del pivote.

Los datos de volumen recogido se obtuvieron con una probeta de 1000 ml y una precisión de 10 ml y se registraron asociados al pluviómetro del que se obtuvieron. Los pluviómetros fueron numerados en forma ascendente desde el centro del pivot hacia el extremo y se correlacionaron con la torre en la que se ubicaban. Las observaciones erróneas (pluviómetros que se dan vuelta, aplastados por la rueda del pivot, etc.) se corrigen como la media de los dos pluviómetros más próximos. Se midió el volumen de agua recogido tan pronto como fue posible, comenzando por aquellos ubicados en el extremo de la parcela, que fueron los primeros en completar su volumen.

Los volúmenes recogidos en los pluviómetros fueron ponderados, ya que lo recogido en los diferentes puntos representa áreas cada vez mayores a medida que aumenta la distancia al centro de pivot (Tarjuelo, 1995). La ponderación se realizó multiplicando el volumen recogido por la distancia en metros desde el pluviómetro al centro del pivot.

La media ponderada de las cantidades recogidas se obtuvo dividiendo la suma de los valores ponderados por la suma de las distancias de los pluviómetros al centro del pivot. De esta manera se construyó el valor de altura media recogida en mm (AMR) para el equipo y para cada torre.

Para hacer una estimación del área bien regada se construyó un rango que abarca desde el 85% de la AMR hasta 115% de AMR. El área que se encuentra por debajo de 85% y por encima de 115% de AMR corresponde al área infra y suprarregada respectivamente. Este cálculo se realizó en base al área evaluada, que es menor al área regada, por lo que los resultados se expresan en porcentaje para extrapolarlo a toda el área de riego.

A partir de los datos de AMR se construye un gráfico en función del largo del equipo y otra en función de la superficie, permitiendo identificar problemas puntuales en alguna torre. En el gráfico también se indica la AMR promedio del equipo, la AMR promedio del 15% menos regado y la AMR promedio del 15% más regado.

Para el caso del pivot 3 que cuenta con cañón, el análisis de datos se realizó en dos oportunidades: teniendo en cuenta los pluviómetros que recogen el agua del cañón y sin tenerlos en cuenta.

### 3.3. VARIABLES Y PARÁMETROS CALCULADOS

#### 3.3.1. Uniformidad de distribución (UD)

La uniformidad de distribución (UD) es un parámetro que se utiliza como indicador de la uniformidad de la altura de agua aplicada en el conjunto de la parcela.

$$UD = \frac{\bar{x}_{<25\%}}{\bar{x}}$$

Donde:

$\bar{x}_{<25\%}$  es la media ponderada de los volúmenes del 25% de pluviómetros que menos recogen;

$\bar{x}$  es la media ponderada de los volúmenes recogidos.

#### 3.3.2. Coefficiente de Uniformidad de Heermann y Hein (CU<sub>h</sub>)

Siguiendo el criterio de la norma ANSI/ASAE S436.1 junio 1996, para el análisis de los datos se utilizó el Coeficiente de Uniformidad de Heermann y Hein:

$$CU_h = 100 \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_i |V_i - \bar{V}_p|}{\sum_{i=1}^n V_i S_i} \right]$$

Dónde:

$CU_h$  es el coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein;

$n$  es el número de pluviómetros utilizados en el análisis de datos;

$i$  es un número asignado para identificar un determinado pluviómetro que comienza

con  $i= 1$  para el pluviómetro situado más próximo al pivot, terminando con  $i= n$  para el pluviómetro más remoto desde el centro de pivot;

$V_i$  es el volumen del agua recogido en el  $i$ -ésimo pluviómetro;

$S_i$  es la distancia del  $i$ -ésimo colector desde el centro del pivot.

Este coeficiente se utiliza como indicador del buen funcionamiento del equipo y debe superar el 80-85%.

### 3.3.3. Coeficiente de variación ( $CU_v$ )

Este parámetro está basado en el coeficiente de variación, por lo que es más sensible a las variaciones extremas de lámina recogida por los pluviómetros que el  $CU_h$ .

$$CU_v(\%) = \left[ 1 - \frac{1}{\frac{\sum V_i S_i}{S_i}} \times \sqrt{\frac{\sum \left( V_i - \frac{\sum V_i S_i}{S_i} \right)^2 S_i}{\sum S_i}} \right] \times 100$$

Donde:

$CU_v$  es el coeficiente de variación;

$i$  es un número asignado para identificar un determinado pluviómetro que comienza con  $i= 1$  para el pluviómetro situado más próximo al pivot, terminando con  $i= n$  para el pluviómetro más remoto desde el centro de pivot;

$V_i$  es el volumen del agua recogido en el  $i$ -ésimo pluviómetro;

$S_i$  es la distancia del  $i$ -ésimo colector desde el centro del pivot.

### 3.3.4. Lámina ponderada de las cantidades recogidas (LMR o AMR)

LMR o AMR es la media ponderada del volumen de agua recogida y se calcula como:

$$LMR = \frac{\sum_{i=1}^n V_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

Donde:

$V_i$  es el volumen del agua recogido en el  $i$ -ésimo pluviómetro;

$S_i$  es la distancia del  $i$ -ésimo colector desde el centro del pivot.

### 3.3.5. Pluviometría media y máxima en el lateral

#### 3.3.5.1. Pluviometría media del lateral ( $P_M$ )

$$P_M = \frac{LMR(mm) * V(m/h)}{2 * ra(m)}$$

Donde:

$V$  es la velocidad de avance de la torre exterior;

$LMR$  es la lámina media recogida;

$ra$  el radio mojado por el emisor en el extremo del pivot.

### 3.3.5.2. Pluviometría máxima en el extremo del lateral ( $P_m$ )

$$P_m = \frac{4}{\pi} * P_M$$

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cuadro No. 2 se presentan las presiones de trabajo en dos puntos del equipo para cada uno de los equipos en sus distintas evaluaciones (PC1.1= equipo 1, evaluación 1; PC1.2= equipo 1, evaluación 2; PC2= equipo 2; PC 3.1= equipo 3, evaluación 1; PC 3.2= equipo 3, evaluación 2; PC 3.3= equipo 3, evaluación 3; PC 3.4= equipo 3, evaluación 4; PC 3.5= equipo 3, evaluación 5; PC 3.6= equipo 3, evaluación 6; PC 4= equipo 4).

Cuadro No. 2.Presiones de trabajo

Pívor evaluado	Presión cabecera o torre 1 (bar)	Presión última torre o alero (bar)
PC1.1	2,8	1,6
PC1.2	2,8	2,5
PC2	1,5	0,5
PC3.1	2,41	1,17
PC3.2	2,41	1,17
PC3.3	3,1	3,3
PC3.4	3,1	3,3
PC3.5	3,1	3,1
PC3.6	3,1	3,1
PC4	3,45	1,24

Se observa una disminución de presión importante (51%) en PC3.1 y PC3.2 a pesar de no ser un equipo largo. No se cuenta con datos de pendiente para estas evaluaciones por lo que no se puede asegurar que este sea el factor que determina esa baja de presión.

Las mayores pérdidas de presión, como es de esperar, se dan en los equipos PC2 Y PC4 (67% y 64% respectivamente) por ser los de mayor longitud, aunque en PC4 se alcanza una presión final adecuada para los emisores. En PC2 se generan variaciones de lámina recogida importantes y visibles en la gráfica de AMR en función de la

superficie (figura No. 5) a partir del tramo 5 asociados a esta pérdida de presión, pudiendo ser en parte causados porque la evaluación se realiza con pendiente ascendente de 2,1%. El PC4 no demuestra este comportamiento (figura No. 13), siendo la disminución de AMR muy importante a partir del comienzo del alero y probablemente explicada por otros factores (emisores tapados, mantenimiento de las boquillas). La principal diferencia entre estos dos equipos es la presión en la última torre, en el PC2 la disminución de presión es tal que queda por debajo del límite de trabajo de los reguladores de presión (aproximadamente 1 bar) por lo que estos no pueden cumplir su función correctamente. En el caso de PC4, a pesar de que la magnitud de la disminución de presión es la misma, el valor de presión en la cabecera del equipo es más alto, haciendo que en la última torre el límite de trabajo de los reguladores no sea alcanzado, pudiendo mantener en mejor medida la AMR.

En PC 3.5 y PC 3.6 la pendiente ascendente del terreno no es importante (1,5%) por lo que hay poca variación de presión a lo largo del equipo, asociado al buen funcionamiento de los reguladores de presión, que favorecen la correcta distribución de agua.

En el cuadro No. 3 se indican las velocidades de avance, anchos de mojado y pluviometría máxima para cada evaluación.

Cuadro No. 3. Velocidad de avance, ancho de mojado y pluviometría máxima

	Velocidad de avance (m/min)	Ancho de mojado (m)	Pluviometría máxima (mm/h)
PC1.1	0,7	12	58
PC1.2	0,7	11,8	58
PC2	3	9	131
PC3.1	0,7	18,5	38
PC3.2	0,7	18,5	41
PC3.3	0,8	11	58
PC3.4	0,8	11	69
PC3.5	0,8	11	71
PC3.6	0,8	11	86
PC4	2,3	19	107

García Petillo (2010), Cruz et al. (2012), Morales et al. (2014), Tarjuelo, citado por Morales et al. (2014), encontraron que para equipos de entre 360 y 800 m de largo las pluviometrías máximas se encuentran entre 40 y 155 mm/h, rango dentro del cual se ubican los equipos 2 y 4. No se encontraron reportes sobre pluviometrías máximas en equipos de menor longitud, no siendo posible calificar los equipos 1 y 3.

PC2 es el equipo que genera la mayor pluviometría máxima asociado al largo del equipo y menor ancho de mojado. Es de esperar que, si los equipos estuvieran en igualdad de condiciones de suelo, generara mayores problemas de escorrentía y erosión (gran volumen de agua concentrado en poca área). Para mitigar este problema podría elevarse la altura de los emisores (Faci et al., 2001) o aumentar el ancho de mojado cambiando las boquillas o usando “booms” (Morábito et al., 2015) y aumentar la presión de trabajo para lograr un mayor radio de alcance de los emisores.

Cabe destacar que en ninguna de las evaluaciones se observaron problemas de escurrimiento o encharcamiento, lo que no significa que no existan en los riegos

habituales, porque las evaluaciones se realizaron, en su mayoría, a máxima velocidad (menor lámina aplicada) y con baja humedad de suelo. La infiltración no es independiente de la cobertura del suelo, por eso suelos con restos de cultivo aumentan la velocidad de infiltración porque protegen la superficie del suelo del impacto de las gotas (Tarjuelo, 1995). Es importante realizar manejos culturales que favorezcan la cobertura del suelo para disminuir el riesgo que genera el uso de estos equipos en algunas zonas del Uruguay.

En el caso del equipo 3 las diferencias en velocidad de avance son determinadas por diferencias en la presión de trabajo debido a que es un equipo hidráulico. Estas diferencias de velocidad causan variaciones en la pluviometría máxima, siendo ésta mayor a menor velocidad de avance.

En el cuadro No. 4 se presentan las láminas de agua aplicada por el equipo y las recogidas en las distintas evaluaciones.

Cuadro No. 4. Láminas aplicadas y recogidas

	AMA*	AMR**
PC1.1	15,00	13,71
PC1.2	15,00	12,67
PC2	6,02	5,07
PC3.1	15,00	14,23
PC3.2	15,00	15,44
PC3.3	15,00	10,36
PC3.4	15,00	11,73
PC3.5	15,00	12,60
PC3.6	15,00	15,34
PC4	13,20	11,62

\*Altura media aplicada (mm)

\*\*Altura media recogida (mm)

El equipo 3 (PC 3.1, PC3.2, PC3.3, PC3.4, PC3.5 y PC 3.6) es el que presenta mayores diferencias entre AMA y AMR por su sistema de avance hidráulico que hace que se generen variaciones de AMR con variaciones de velocidad de avance, que pueden estar asociadas a situaciones de diferente pendiente, aún trabajando a una misma AMA. Este problema se ve agravado por la variabilidad que le aporta el cañón al equipo.

Las láminas medidas presentaron, en general, valores inferiores a las láminas de diseño, lo cual es esperable debido a la existencia de pérdidas por evaporación y arrastre que ocurren al realizar la evaluación. Los valores de PC3.3, PC3.4 y PC3.5 son 31, 22 y 16% inferiores a las laminas de diseño. Las evaluaciones PC 3.2 y PC 3.6 no siguen esta tendencia, siendo AMR mayor que AMA. Ambas evaluaciones no contemplan el cañón, demostrando la baja importante de AMR en el mismo, ya que al incluirlo (PC 3.3 y PC 3.5) se observa una disminución en la AMR promedio.

Pese a esto, todas las evaluaciones (excepto PC 3.3) se encuentran dentro de los parámetros normales: según Morales et al. (2014) las pérdidas por evaporación y arrastre (PEA) normales se encuentran entre 10 y 20%. Tener en cuenta que las estimaciones se hicieron todas durante el día, ninguna en horario nocturno, por lo que las PEA promedio diarias son menores debido a que las PEA son menores durante la noche que durante el día.

Otra causa de que la lámina recogida sea menor a la aplicada es que la velocidad media de avance de la última torre sea mayor a la nominal, como ocurre en los equipos PC 2 y PC 4 (velocidad nominal 2,83 y 2,08 m/min respectivamente).

En el cuadro No. 5 se presentan los parámetros uniformidad de distribución, coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein y coeficiente de variación.

Cuadro No. 5. Parámetros estadísticos de uniformidad de riego

	UD (%)	CU <sub>h</sub> (%)	CU <sub>v</sub> (%)
PC1.1	67	80	71
PC1.2	56	76	66
PC2	80	83	79
PC3.1	62	75	67
PC3.2	74	82	74
PC3.3	67	73	65
PC3.4	78	83	80
PC3.5	68	74	67
PC3.6	81	87	84
PC4	78	88	82

La uniformidad de distribución (UD) es un parámetro que permite evaluar la magnitud de los problemas de aplicación. En términos generales valores aceptables de UD se corresponden con valores aceptables de CU<sub>h</sub> y viceversa. La uniformidad de distribución en los equipos evaluados osciló entre 56 y 81% mientras que el coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein entre 73 y 87%. Valores bajos de UD y CU<sub>h</sub> pueden deberse a bajas presiones a la entrada del equipo, pérdida importante de presión a lo largo del lateral o al estado de las boquillas que pueden estar obstruidas, dañadas o faltantes.

El CU<sub>v</sub> es un parámetro más sensible que CU<sub>h</sub> a las variaciones extremas de lámina recogida porque se construye en base al coeficiente de variación, en el caso en que las laminas recogidas a lo largo del equipo son menos uniformes mayores diferencias se encuentran entre estos dos parámetros. Esto se observa claramente en el equipo que presenta boquillas sectoriales (PC1.1 y PC1.2) y en las evaluaciones del equipo 3 con cañón (PC3.1, PC3.3 y PC3.5).

En el equipo PC2 se logran valores aceptables de UD y CU<sub>h</sub> a pesar de que la presión de trabajo tuvo una caída importante.

Las evaluaciones de PC3 con cañón (PC3.1, PC3.3 y PC3.5) no logran alcanzar el valor mínimo de  $CU_h$  deseado (80%). Cabe destacar que este equipo está diseñado para el riego de pasturas permanentes, que según García, citado por Tornés et al. (2009) admiten  $CU_h$  menores, entre 70 y 82%, para lograr buenos resultados en el cultivo.

Según indica Ortega et al. (2004) se espera que los equipos PC2 y PC4 logren altos rendimientos de cultivo con menor cantidad de agua por unidad de producto (eficiencia de uso del agua) que PC3, porque los primeros logran mejores resultados en cuanto a coeficientes de uniformidad se trata.

Al no evaluar un mismo equipo con más de un tipo de boquillas, no se puede conocer el efecto que estas tienen sobre los parámetros de uniformidad de riego. De todas maneras, tomando como ejemplo el equipo PC3 se observa gran variación entre coeficientes de uniformidad en las distintas evaluaciones con el mismo tipo de boquilla, por lo que este factor no sería el más influyente sobre los parámetros calculados, conclusión coincidente con Tarjuelo et al. (2014).

En el cuadro No. 6 se presentan el área regada adecuadamente y la distribución de áreas en infra y supraregada con su correspondiente clasificación de área regada.

Cuadro No. 6. Distribución del área evaluada por equipo en áreas infra, supra y bien regada.

	ARA (%)	Área infrarregada (%)	Área suprarregada (%)	Clasificación del área regada
PC1.1	62	15	23	BR
PC1.2	42	25	33	IR
PC2	51	26	23	IR
PC3.1	40	26	34	IR
PC3.2	56	15	29	IR
PC3.3	37	26	37	IR
PC3.4	51	29	20	IR
PC3.5	34	26	40	IR
PC3.6	60	21	19	BR
PC4	80	11	9	MBR

Resultados encontrados por López Mata et al. (2010) muestran que no es viable económicamente pretender dejar bien regada el 100% de la parcela. Según esto, puede ser suficiente dejar bien regada o sobre regada entre el 70-80% de la parcela que es cuando se consigue la mayor eficiencia de uso del agua, ya que esta disminuye mas rápidamente cuanto mayor es el valor de ARA a partir de ciertos valores de agua de riego aplicada. Generalmente pasar de un valor de ARA de 70 a 90% consigue un escaso incremento en el rendimiento del cultivo que no compensa el gran incremento de consumo de agua que supone.

PC1.1 y PC3.6, y PC4 logran alcanzar el carácter de bien regado y muy bien regado respectivamente y tienen valores aceptables de  $CU_h$ , mostrando la correlación entre ARA y  $CU_h$  reportada por Jiménez et al. (2010, 2012), aunque no ocurre lo mismo con la UD. En el caso de PC1.1 que corresponde a la categoría bien regado no logra superar el valor de 70% de UD ( $UD=67\%$ ). Esto acompaña las afirmaciones de Jiménez et al. (2010) que no siempre existe buena asociación entre ARA y UD porque este

último parámetro toma en cuenta el 25% de los valores más bajos de lámina, siendo estos descartados para el cálculo de ARA.

PC1.2, PC3.1, PC3.3, PC3.5 además de no lograr valores aceptables de  $CU_h$  y UD, tienen un bajo valor de ARA que los ubica en la categoría de incorrectamente regado.

PC2, PC3.2 y PC3.4 logran valores aceptables de  $CU_h$  pero son clasificados como incorrectamente regados. Pese a esto, la suma del ARA y área suprarregada se encuentra entre 70% y 80% que según indican López Mata et al. (2010) serían suficientes para cubrir los requerimientos del cultivo, aunque no maximiza la eficiencia de uso del agua.

El gráfico de altura de agua aplicada a lo largo del lateral puede ayudar a identificar problemas en el funcionamiento de la máquina. Aquellos tramos donde -a lo largo del lateral- la altura de agua aplicada sea un 10 % mayor o menor que la altura de agua media deben ser analizados para determinar la causa de la variación (Morábito et al., 2015).

En todos los casos, excepto PC4 (que es el único muy bien regado), las láminas promedio disminuyen en los últimos tramos con respecto a los primeros. Este es un comportamiento no deseado ya que disminuyen los coeficientes de uniformidad y no se logra el objetivo de un riego uniforme en toda la parcela, problema agravado porque los últimos tramos abarcan mucha superficie. Este fenómeno puede explicarse en alguna medida por la relación de las velocidades de las torres (PC2 y PC4), por las pequeñas obstrucciones que se producen en el momento de las evaluaciones (PC4), así como la disminución de la presión de trabajo a lo largo del lateral (PC2).

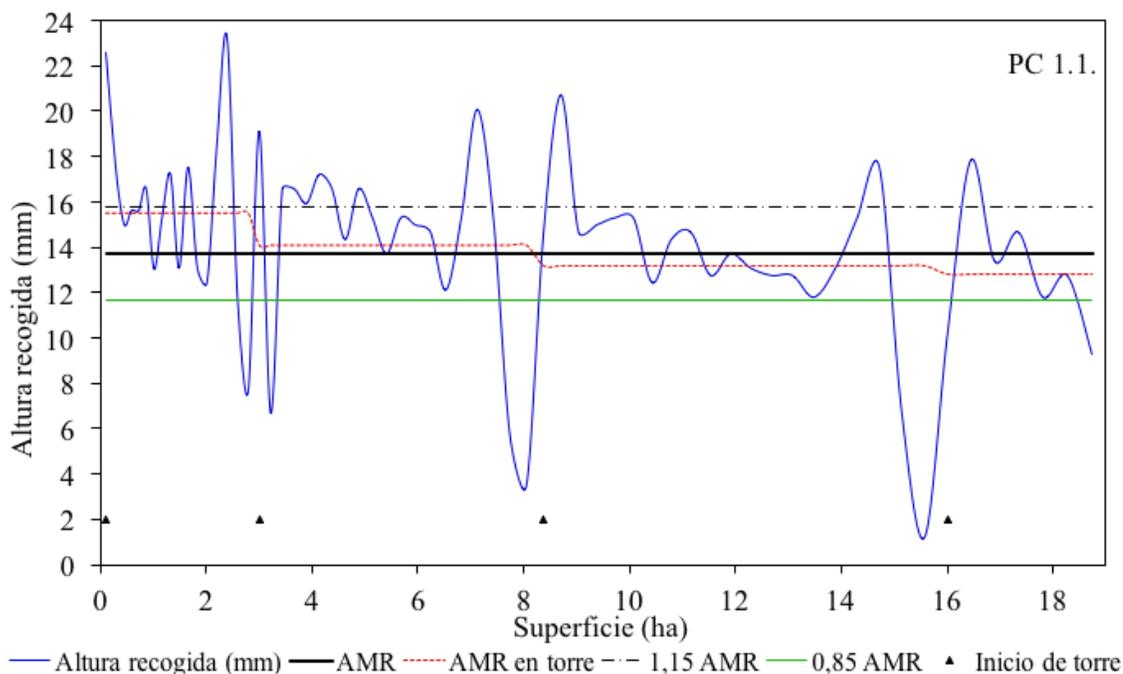


Figura No. 3. AMR en función de la superficie (PC1.1)

A pesar de que existe una pérdida de presión a lo largo del equipo PC1 de 43%, el final de la última torre todavía se encuentra por encima del límite de trabajo de los reguladores, por lo que no debería generar problemas importantes en cuanto a disminución de lámina recogida.

Existe una caída de la lámina a lo largo del equipo pero el promedio de todos los tramos se encuentran entre el 85 y el 115% de la AMR promedio, generando que este equipo se encuentre en la categoría de bien regado.

El área bien regada más el área suprarregada es superior al 80% del total, por lo que alta proporción del cultivo se encontraría con sus requerimientos cubiertos.

Comparando esta evaluación con la segunda del mismo equipo se observa que el alero no presenta una caída importante de AMR, evidenciando el buen funcionamiento del equipo en esta oportunidad (figura No. 4).

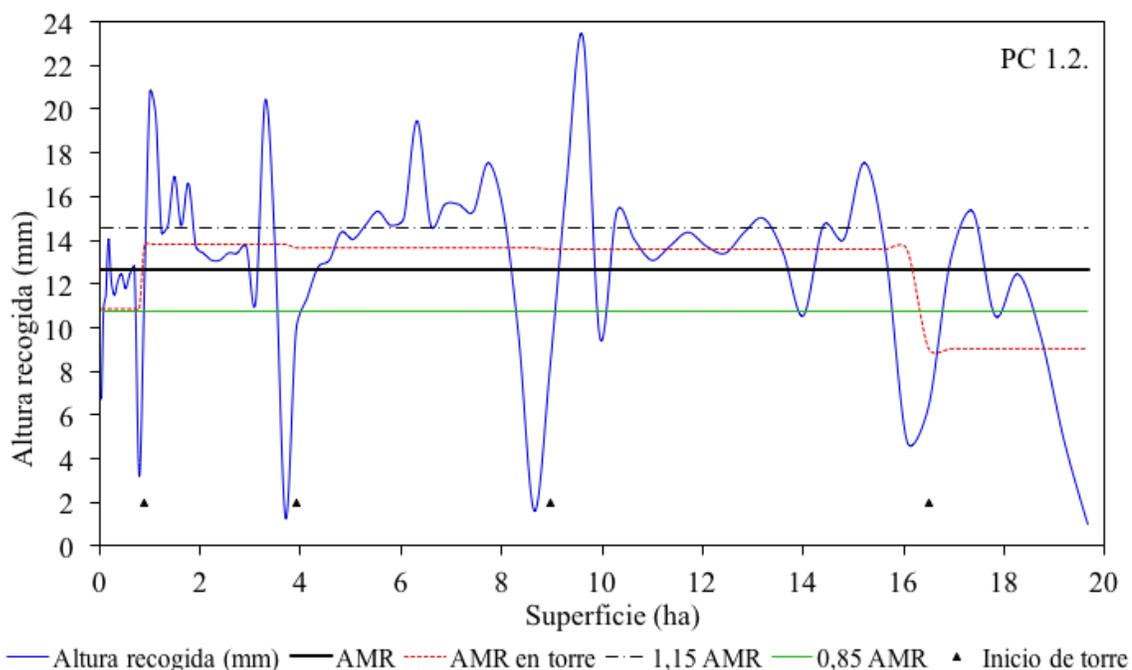


Figura No. 4. AMR en función de la superficie (PC1.2)

En el gráfico de altura de agua recogida (mm) en función de la superficie evaluada, se ve, para el equipo 1 en sus dos evaluaciones (PC1.1 y PC1.2) una importante disminución de lámina recogida al final de cada tramo que coincide con los emisores de tipo sectorial (huella seca). Este tipo de boquillas reduce notablemente la cantidad de agua que resbala por la estructura de la torre y cae en la pisada de la rueda del pivot reduciendo visiblemente el efecto de la huella, aunque disminuye la uniformidad de distribución porque aplica un volumen menor de agua hacia un lado de la boquilla y un volumen mayor en el sentido opuesto.

En el caso de PC1.2 los mayores problemas se encuentran en el alero como se observa en la figura No. 4, con una AMR del tramo 29 % por debajo de la AMR promedio. Al ubicarse en el extremo del pivot abarca una superficie importante (18% del área), sumado a que el tramo 1 tampoco alcanza valores adecuados de AMR (86% de la AMR promedio). Con estos dos tramos el 22% del área se encuentra con problemas de uniformidad. Estos problemas no estarían asociados a disminución en la presión de trabajo, debido a que solo baja un 11% .

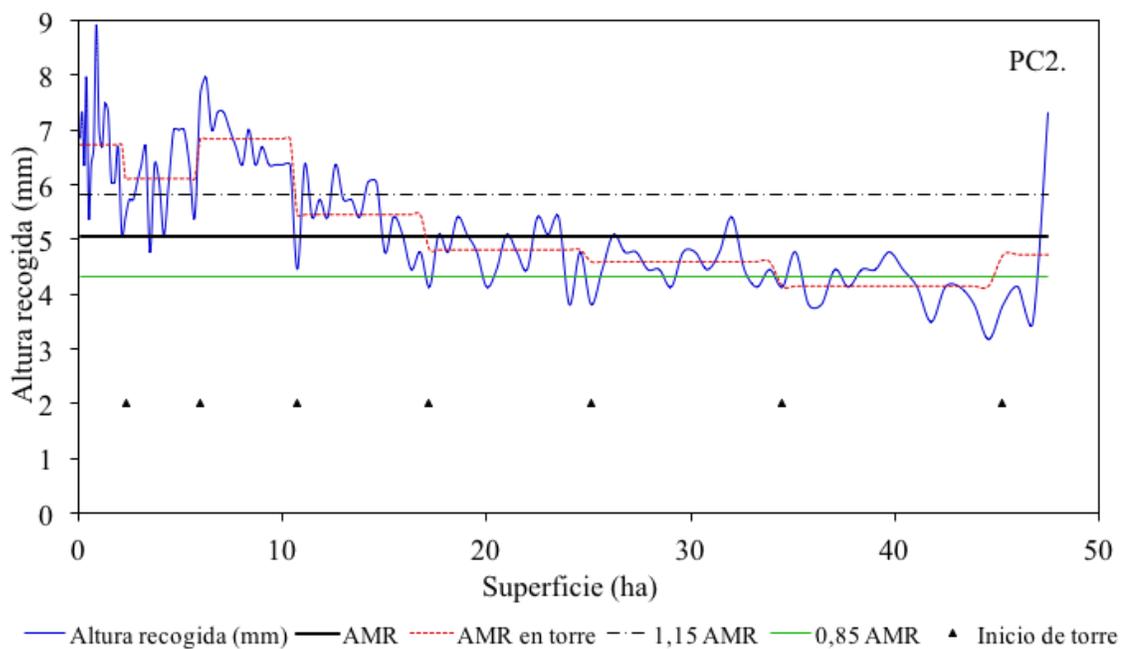


Figura No. 5. AMR en función de la superficie (PC2)

En la evaluación a campo se observó un importante problema con el efecto de la huella de la rueda, que puede ser solucionado con el uso de boquillas de tipo sectorial.

En PC2 se da una contradicción, porque sí tiene buenos parámetros de uniformidad ( $UD$  y  $CU_h$ ) pero aún así está en la categoría de incorrectamente regado. Para conocer las posibles razones se analizan los parámetros de uniformidad  $CU_h$  y  $UD$  por tramo. Los resultados se muestran en el cuadro No. 7.

Cuadro No. 7.  $CU_h$  y UD por tramo (PC2)

	$CU_h$	UD
Tramo 2	75	84
Tramo 3	83	85
Tramo 4	74	93
Tramo 5	89	85
Tramo 6	91	86
Tramo 7	88	90
Tramo 8	77	86
Alero	68	74

La variabilidad dentro de cada tramo es pequeña, por esta razón el UD por tramo toma valores aceptables en todos los casos.

Al medir uniformidad de aplicación como  $CU_h$  se observan valores no aceptables (por debajo de 80%) en los últimos dos tramos, que abarcan un 28% del área, afectando en mayor medida al ARA y no tanto al  $CU_h$  global, datos coincidentes con los reportados por Jiménez et al. (2012).

Analizando las láminas recogidas por tramo se observa que, excepto en los tramos 5, 6 y el alero, el resto tienen grandes diferencias con la lámina recogida promedio, siendo en algunos casos mayor a 30% (tramos 2 y 4). La lámina recogida por los dos tramos finales tienen más de 10% de diferencia con la lámina recogida promedio mostrando posibles inconvenientes generados por una disminución de 67% de la presión de trabajo a lo largo del equipo, llegando al final con presiones inferiores al límite de trabajo de los reguladores.

Este equipo cuenta con un sistema de liberación de presión en el extremo distal que genera una descarga de agua de importante volumen y hace que la altura recogida por el alero promedio sea más alta que la recogida por los últimos tramos a diferencia del resto de los equipos.

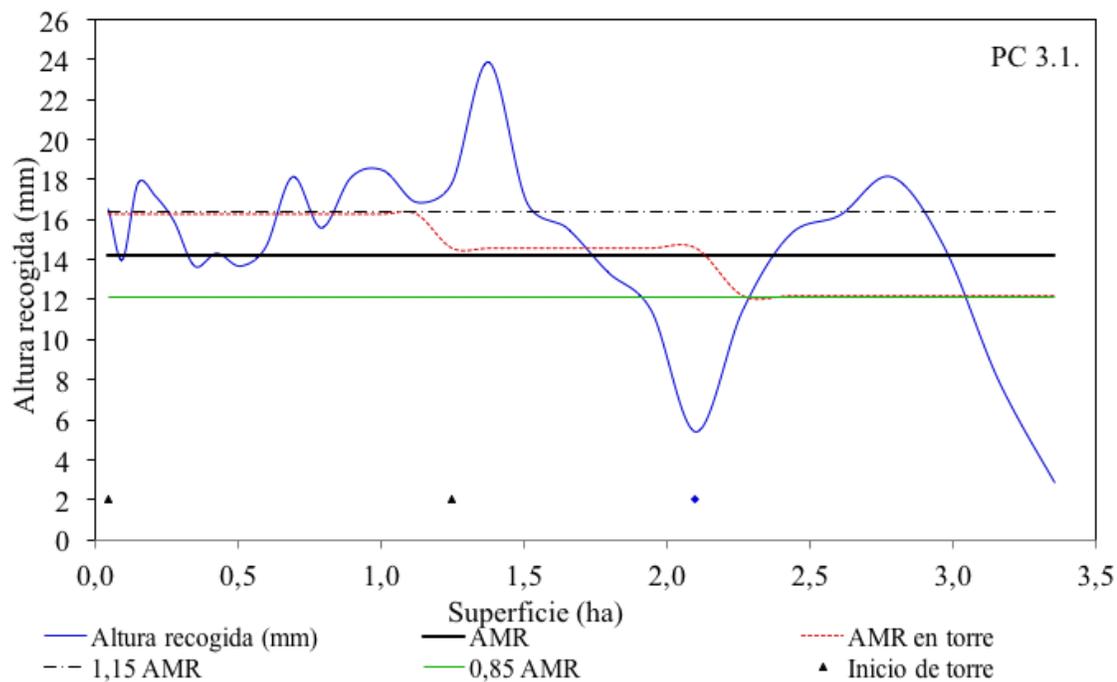


Figura No. 6.AMR en función de la superficie (PC3.1).

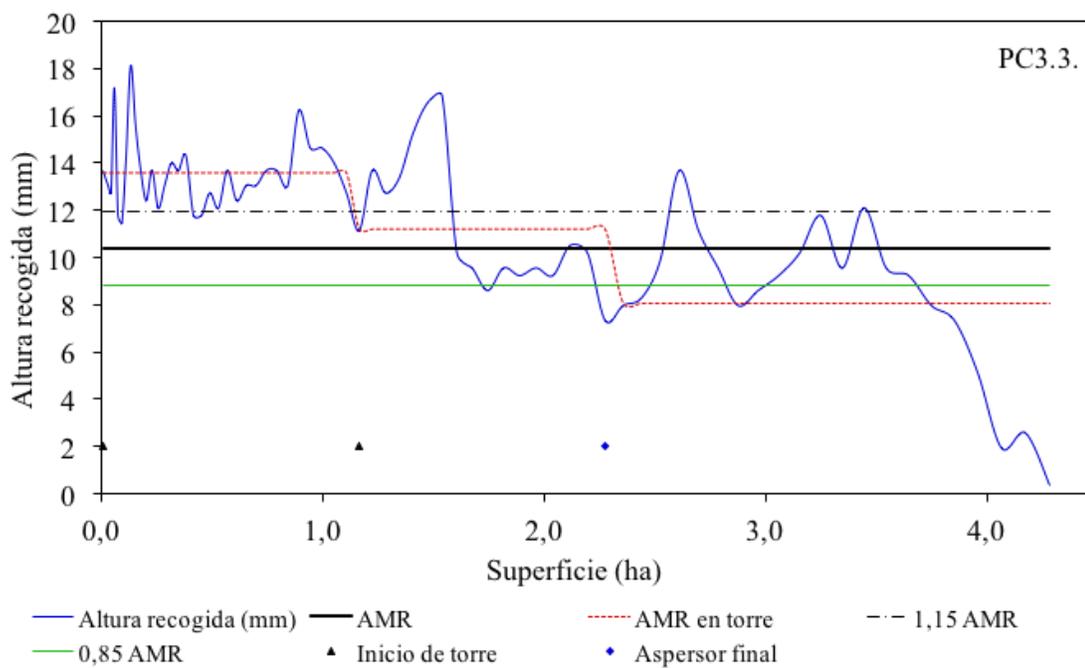


Figura No. 7.AMR en función de la superficie (PC3.3)

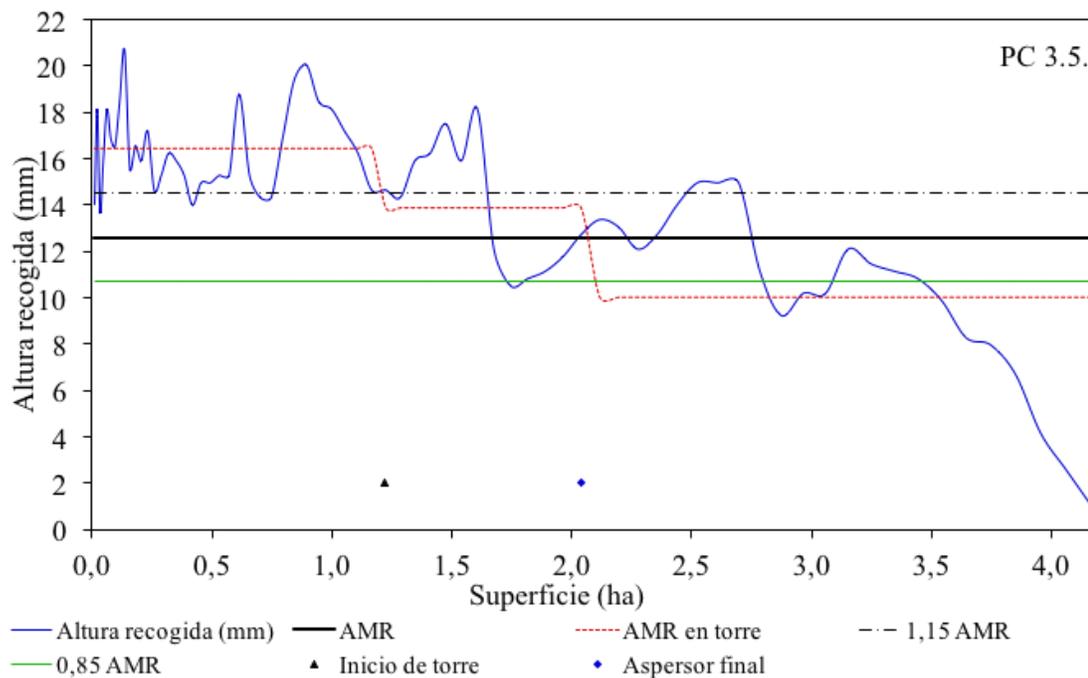


Figura No. 8. AMR en función de la superficie (PC3.5)

Las evaluaciones PC3.3 y PC3.5 tienen un área menor evaluada que PC3.1 posiblemente debido a la presión de trabajo menor en esta última, que genere un menor alcance del cañón. Estas diferencias demuestran que al tener cañón, el área regada es muy dependiente de la presión de trabajo, con diferencias en este caso de casi media hectárea.

En las tres evaluaciones que incluyen el cañón se observan diferencias de más de 10% de lámina recogida entre el tramo 1, el cañón y el promedio del equipo.

Para evaluar la magnitud del problema que genera la inclusión del cañón se evaluó el  $CU_h$  de este tramo para cada una de las evaluaciones, arrojando valores de 66, 66 y 64% para las evaluaciones PC3.1 PC3.3 y PC3.5 respectivamente, muy inferiores al mínimo de 80% deseado (figura No. 12).

Las figuras No. 9, 10 y 11 muestran la distribución de pluviometría en la superficie sin tomar en cuenta el cañón.

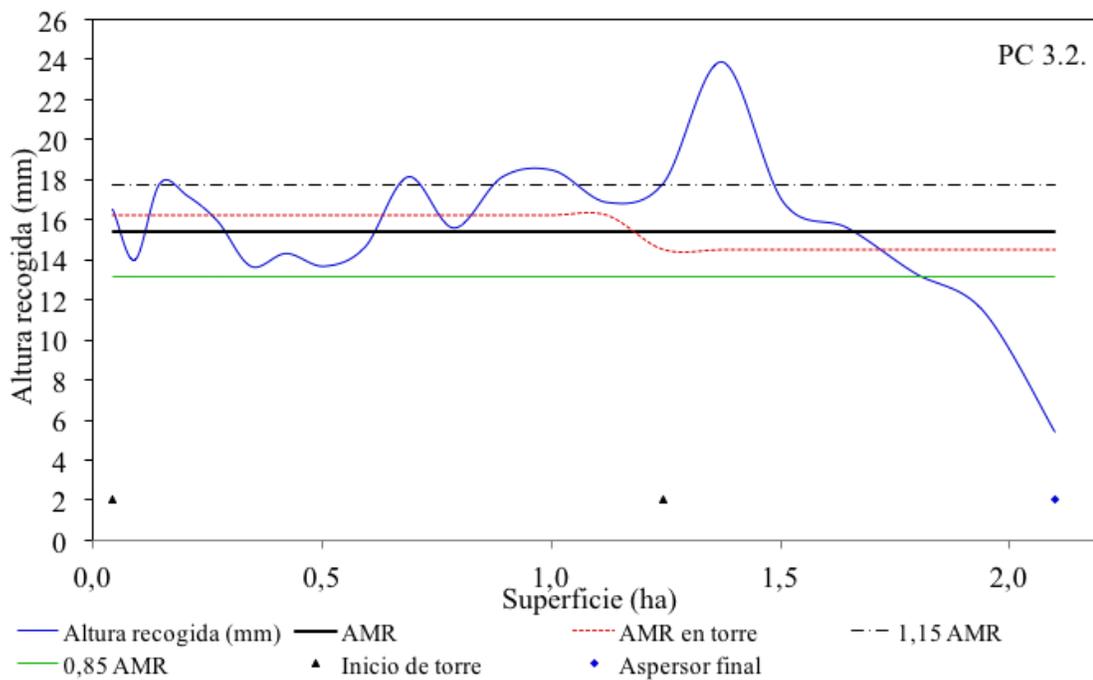


Figura No. 9.AMR en función de la superficie (PC3.2)

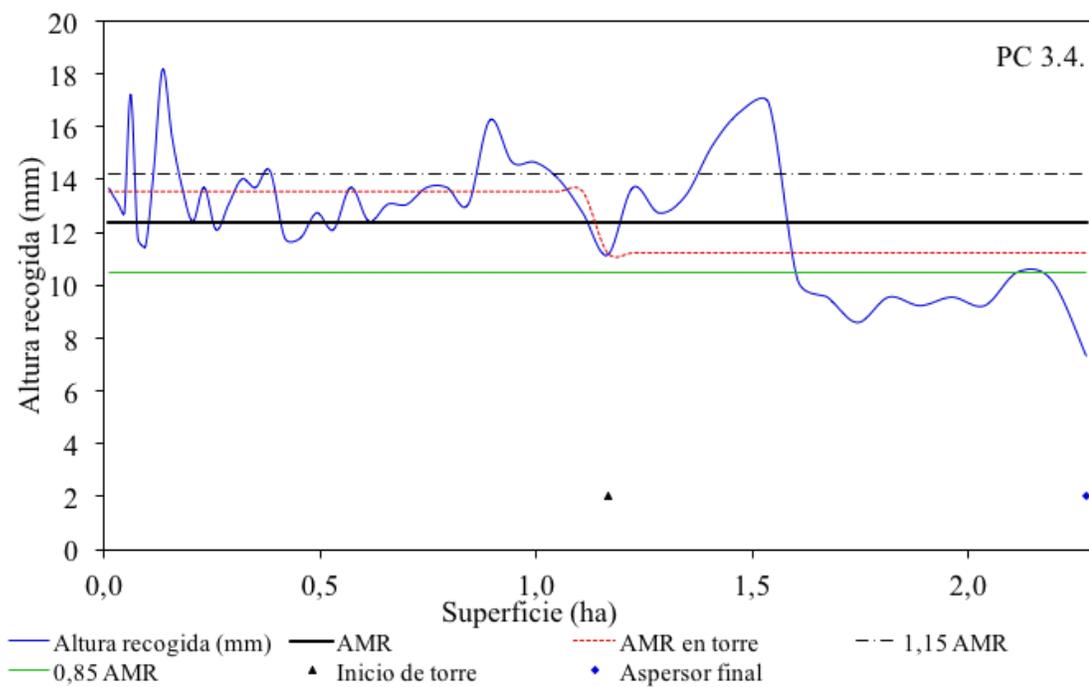


Figura No. 10.AMR en función de la superficie (PC3.4)

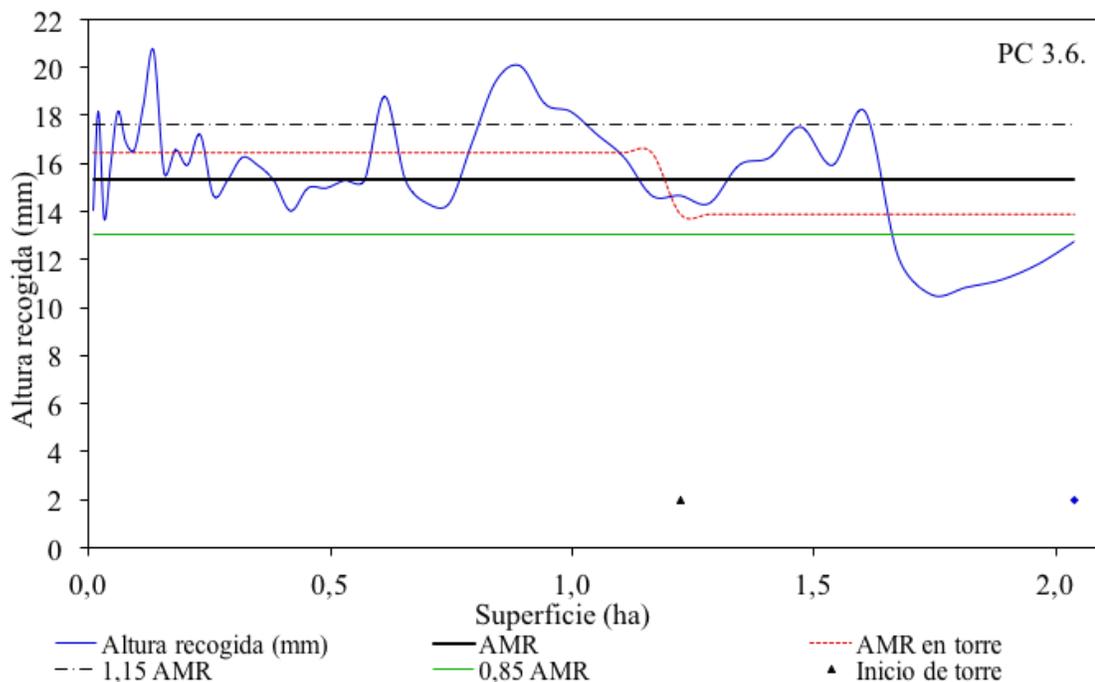


Figura No. 11. AMR en función de la superficie (PC3.6)

En cuanto a la superficie de riego las evaluaciones PC3.2 y PC3.4 son incorrectamente regadas y la PC3.6 bien regada. La principal diferencia entre estas evaluaciones radica en el alero que, en el caso de PC3.6, cuenta con menor proporción de área infra y suprarregada.

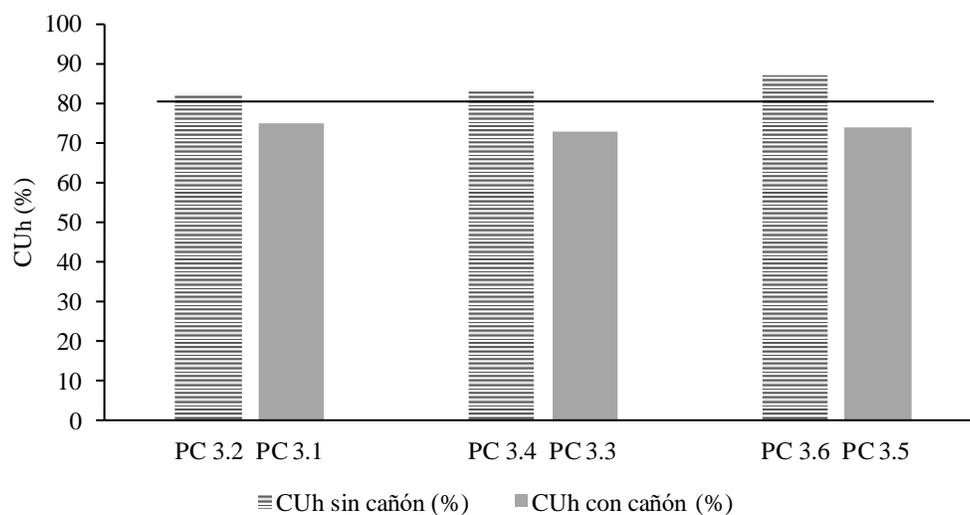


Figura No. 12. Coeficiente de Heermann y Hein con y sin cañón

Para las tres evaluaciones el cañón disminuye el coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein del equipo 3, haciendo que estos se encuentren por debajo de los sugeridos como aceptable (80%), datos coincidentes con los reportados por Naroua et al. (2012). La UD tampoco logra superar el valor mínimo (70%), pudiendo fijarse como principal problema en la distribución de agua la inclusión del cañón. Parte de la desuniformidad generada por el cañón ocurre naturalmente cuando se trabaja en condiciones con viento, la otra parte responde a que los cañones son equipos que trabajan a presiones de entre 3,4 y 4,9 bar (Tarjuelo, 1995), no alcanzando estos valores en ninguna de las evaluaciones. Aquí radica una de las contradicciones de usar cañón en pivot centrales, ya que tienen altos requerimientos de presión mientras que la principal ventaja del pivot es el menor consumo energético por trabajar a bajas presiones. Debería replantearse si esta disminución de calidad de distribución de agua que probablemente genere desuniformidad en el cultivo se ve compensada por la mayor producción en el área (37% extra) regada por el cañón y si enmienda la ineficiencia energética.

Ninguna de las tres evaluaciones con cañón logra la categoría de bien regado.

Si no se toma en cuenta el cañón este equipo logra muy buenos resultados en los parámetros de distribución.

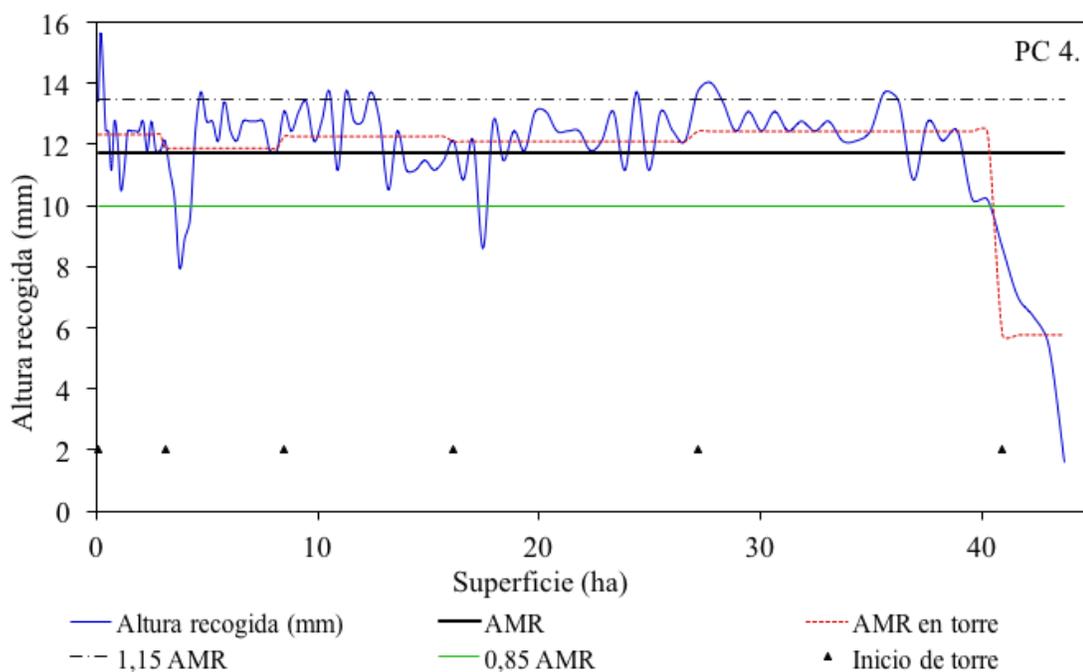


Figura No. 13. AMR en función de la superficie (PC4)

El PC4 es el equipo que logra los mejores resultados de las evaluaciones realizadas, superando los niveles aceptables de UD y  $CU_h$  y logrando ARA de 80% que lo coloca en la categoría de muy bien regado.

La disminución de AMR en el alero se observó a campo como obstrucción o rotura de boquillas que determinaban bajo volumen de descarga.

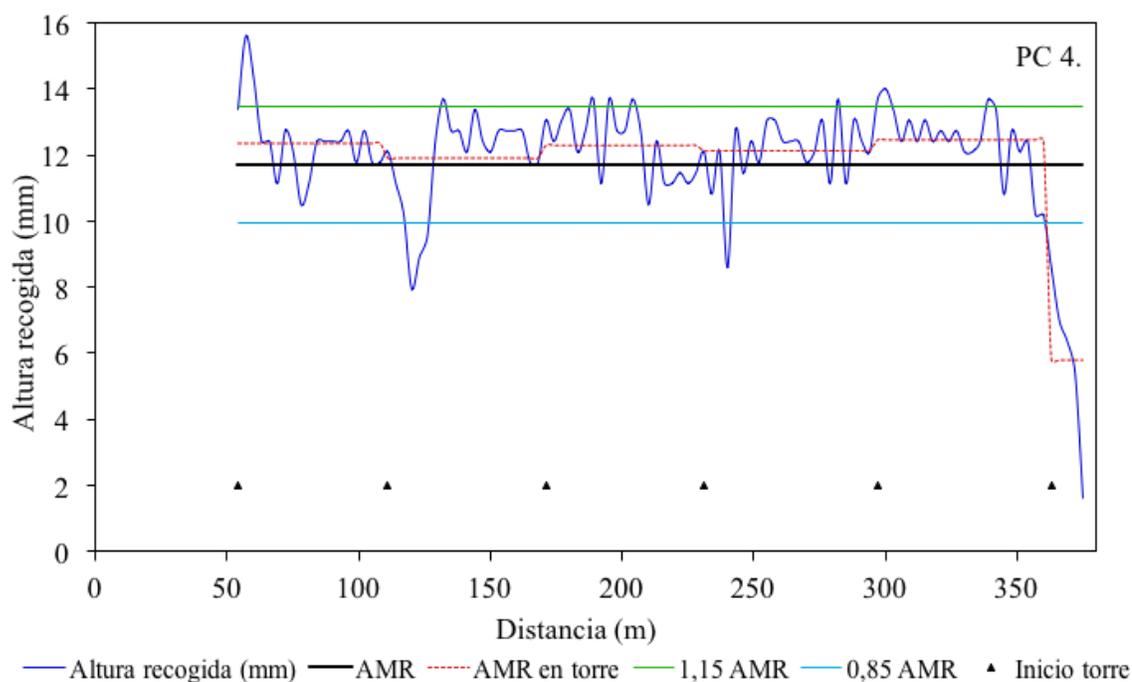


Figura No. 14. AMR en función de la distancia al centro del pivot (PC4)

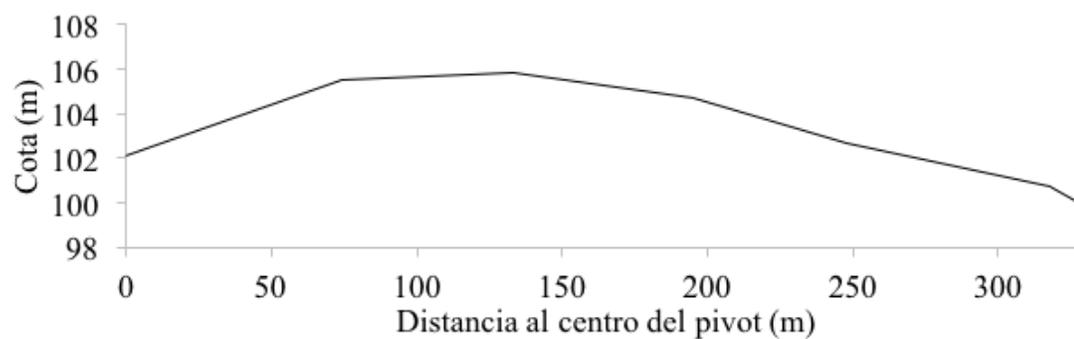


Figura No. 15. Perfil de altimetría en PC4

Al observar en conjunto la gráfica de altura recogida en función de la distancia al centro del pivot (figura No. 14) y el perfil de altimetría (figura No. 15) se observa que en líneas generales hay una disminución en AMR promedio del tramo a medida que la pendiente es ascendente, aumentando cuando la pendiente se torna favorable. Por esta característica de doble pendiente (figura No. 15) es que no tiene sentido llegar a un valor de pendiente promedio.

## 5. CONCLUSIONES

Para las condiciones productivas del Uruguay pueden lograrse buenos resultados en parámetros de uniformidad de distribución de agua con equipos pivot centrales, permitiendo incorporar esta tecnología para aumentar los rendimientos de cultivos y pasturas y estabilizar la producción de los mismos. Es muy importante el diseño adecuado del proyecto, que contemple las condiciones de cada sitio en particular.

Como era de esperarse, las pérdidas más importantes de presión se dan en los equipos de mayor longitud, equipos 2 y 4, aunque dentro de las evaluaciones realizadas fueron los que consiguieron los mejores coeficientes de uniformidad. En el caso de PC2 la pérdida es tal que el equipo trabaja por debajo de los límites de los reguladores de presión y aún así no se ven perjudicados los parámetros de uniformidad.

Las pluviometrías máximas se encuentran dentro del rango citado por la bibliografía. Comparando estos valores con la velocidad de infiltración de los suelos del Uruguay podrían generar problemas de erosión por escurrimiento, más grave aún en equipos largos (PC2 y PC4). Dentro de los equipos potencialmente más riesgosos, PC4 tiene como parte de su diseño la inclusión de “booms” para disminuir el valor de Pmax en el extremo del lateral. Sería importante para evaluaciones futuras realizar pruebas de infiltración en el área de cada pivot y evaluar el potencial riesgo de que se genere escurrimiento.

El equipo 3 es el que tiene el peor desempeño dentro de los evaluados. Existen grandes diferencias entre la lámina aplicada y la recogida y tiene bajos valores de parámetros de uniformidad. Una posible causa es que su carácter de hidráulico lo hace dependiente de la pendiente y la más importante es que la presencia de cañón genera gran variabilidad en el volumen de agua aplicado.

El equipo 1 tiene emisores de tipo sectorial (huella seca), que le permite reducir el efecto de la huella que dejan las torre del pivot, el equipo 2 no cuenta con este tipo de emisores, siendo visible a campo problemas de huellas profundas que podrían llegar a provocar un mal funcionamiento del equipo o consecuencias sobre la calidad del suelo en el largo plazo. Como desventaja de estas boquillas se destaca que parte del área queda con valores de lámina media recogida bajos que afectan la uniformidad de distribución y el porcentaje de área bien regada.

Se observaron diferencias en los resultados de UD y  $CU_h$  entre equipos y entre evaluaciones de un mismo equipo. En las evaluaciones de los equipos PC1 y PC3 se observan resultados diferentes y arrojan conclusiones contrastantes sobre el funcionamiento de los equipos. Es por esto que sería importante repetir las evaluaciones

de los equipos 2 y 4 para evitar emitir un juicio equivocado acerca de su funcionamiento.

Problemas en los parámetros de distribución y uniformidad de riego fueron asociados a disminución en la presión de trabajo, desempeño incorrecto de las boquillas (rotura u obstrucción) o presencia de cañón. No se pudo evaluar el efecto del tipo de boquilla sobre estos parámetros por no realizar evaluaciones de un mismo equipo con diferentes boquillas.

La mayor parte de las evaluaciones indican que las áreas evaluadas son incorrectamente regadas, explicado en gran parte por el alto número de evaluaciones realizadas en el equipo 3. Sin embargo, más de la mitad de las evaluaciones lograría cubrir los requerimientos del cultivo al superar el 70% en la suma de área bien y suprarregada.

Los parámetros CUh, UD y AMR permiten hacer un diagnóstico general del funcionamiento de los equipos. Cabe destacar la importancia de analizarlos en conjunto para tener resultados completos e integrados a la hora de evaluar un pivot central.

## 6. RESUMEN

En este trabajo se evaluaron cuatro equipos pivot centrales con características contrastantes en predios comerciales de la zona centro- oeste del Uruguay entre diciembre de 2016 y marzo de 2017. La uniformidad de distribución (UD) se encontró en el rango de 56 a 81% y el coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein entre 73 y 88%, siendo para algunos equipos valores no deseados (inferior a 70 y 80% respectivamente). De un total de 10 evaluaciones, únicamente 3 lograron alcanzar la categoría de bien y muy bien regados llegando a valores de área regada adecuadamente (ARA) de 62% (evaluación 1 del equipo 1), 60% (evaluación 6 del equipo 3) y 80% (equipo 4). Los problemas mas importantes se adjudican al uso de boquillas sectoriales, que solucionan problemas físicos de suelo pero afectan los parámetros de distribución de agua, la inclusión de cañón, disminuciones en la presión de trabajo y posible obstrucción de boquillas.

Palabras clave: Coeficiente de uniformidad de Heerman y Hein; Evaluación; Pivot central; Riego; Uniformidad de distribución.

## 7. SUMMARY

This project studies four center-pivot systems with contrasting features in commercial facilities located in the west-center region of Uruguay between December 2016 and March 2017. The Distribution Uniformity (DU) was between a 56 % and a 81 %, while the Heermann and Hein Uniformity Coefficient was between a 73 % and an 88 %, which were undesired values to some of the systems (under a 70 % and an 80 %, respectively). Only three out of 10 tests reached the categories well irrigated and very well irrigated, with Irrigation Efficiency values of a 62 % (PC1.1), a 60 % (PC3.6) and an 80 % (PC4). The Application Efficiency values were normal, except in case 3.3, in which it was 69 %. The main problems are the use of sectoral nozzles, which solves the physical weaknesses of soil, but affects the parameters of water distribution, the inclusion of gun, the decrease of working pressure and the potential nozzle obstruction.

Keywords: Heermann and Hein coefficient of uniformity; Evaluation; Central pivot; Irrigation; Uniformity distribution.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. ASAE (American Society of Agricultural Engineers, US). 2001. ANSI/ASAE S436.1 DEC01 Test Procedure for Determining the Uniformity of Water Distribution of Center Pivot and Lateral Move Irrigation Machines Equipped with Spray or Sprinkler Nozzles. Washington, D. C. pp. 932-938.
2. Bachino, F. 2012. Análisis de costos y rentabilidades en riego por aspersión. In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012, Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 83-97.
3. Clemmens, A.; Dedrick, A. 1994. Irrigation techniques and evaluations. *Advanced Series in Agricultural Sciences*. 22: 64–102.
4. Cruz, F.; Rodríguez, J.; Watts, C.; López, E.; Huez, M.; Garatuza, J.; Yopez, E. 2012. Evaluación técnica de un sistema de riego por pivote central en cultivo de alfalfa. In: Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas (15º., 2012, Mexicali, Baja California, México). Trabajos presentados. Mexicali, Universidad Autónoma de Baja California. pp. 675- 679.
5. Dechmi, F.; Playán, E. 2000. Uniformidad de los sistemas de riego por aspersión en el polígono de La Loma de Quinto (Zaragoza). In: Congreso Nacional de Riegos (18º., 2000, Huelva, España). Trabajos presentados. Madrid, Asociación Española de Riegos y Drenajes. s.p.
6. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, IT). s.f. Uruguay. (en línea). Roma. s.p. Consultado 03 dic. 2017. Disponible en [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries\\_regions/URY/indexesp.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/URY/indexesp.stm)
7. Faci, J.; Salvador, R.; Playán, E.; Sourell, H. 2001. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 127(4): 224- 236.
8. García Petillo, M. 2010. ¿Por qué no regar por gravedad?. In: Seminario internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 67- 72.

9. \_\_\_\_\_. 2012. Conceptos básicos para el diseño y el manejo de riego. In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012, Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 23- 32.
10. GDR (Grupo de Desarrollo del Riego, UY). 2010. Prólogo. In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 3- 4.
11. Hanson, B.; Orloff, S. 1996. Rotator nozzles more uniform than spray nozzles on center- pivot sprinklers. *California Agriculture*. 50(1): 32- 35.
12. Heinemann, A.; Frizzone, J.; Pinto, J.; Feitosa, J. 1998. Influencia da altura do emissor na uniformidade de distribuição da água de um sistema tipo pivô central. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 33(9): 1487-1491.
13. Jiménez, E.; Domínguez, M.; Pérez, R.; Montero, L.; Cun, R. 2010. Estudio de la uniformidad de riego, en una máquina de pivote central. *Revista ciencias técnicas agropecuarias*. 19(1): 73- 78.
14. \_\_\_\_\_.; González, P.; Domínguez, M. 2012. Relación entre parámetros de uniformidad de riego en máquinas de pivote central. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 21(3): 18- 22.
15. López- Mata, E.; Tarjuelo, J.; De Juan, J.; Ballesteros, R.; Domínguez, A. 2010. Efecto de la uniformidad de riego en el rendimiento económico de un cultivo. In: Seminario internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 91-101.
16. Louie, M.; Selker, J. 2000. Sprinkler head maintenance effects on water application uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 142- 148.
17. Madramootoo, C.; Fyles, H. 2010. Irrigation in the context of today's global food crisis. *Irrigation and Drainage*. 59: 40- 52.
18. Mena, M.; Helbert, A.; Tijerina, L.; Acosta, R.; Mejia, E. 2010. Evaluación técnica y económica del manejo de equipos de pivote central. *Terra Latinoamericana*. 28(2): 177- 184.

19. Morábito, J.; Rearte, E.; Schilardi, C.; Martín, L.; Salatino, S. 2015. Desempeño del riego de equipos de pivote central en la provincia de Mendoza, Argentina. *In*: Congreso Nacional del Agua (25°. 2015, Paraná, Entre Ríos, Argentina). Trabajos presentados. s.l., Asociación Internacional de Hidrogeólogos. s.p.
20. Morales, P.; García. M.; García. C.; Beretta. A.; Moreno. G.; Camio, G. 2014. Pivotes en Uruguay Evaluación de su funcionamiento. *In*: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (3°. 2014, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 66-76.
21. Mujica, A.; López, M.; Carmenates, D.; Mujica, C.; Riveron, R. 2014. Evaluación de los indicadores hidráulicos de las máquinas de pivote central eléctrica. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 23(1): 53- 55.
22. Naroua, I.; Rodríguez, L.; Sánchez, R.; Rodríguez, J. 2012. Evaluación de los sistemas de riego por aspersión en la Comunidad de Regantes “Río Adaja” y propuestas para la mejora del manejo del riego. *Tierras de Castilla y León*. no. 193: 98- 101.
23. Ortega, J.; Tarjuelo, J.; De Juan, J.; Carrión, P. 2004. Uniformity distribution and its economic effect on irrigation management in semiarid zones. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 130: 257- 268.
24. Ortíz, J.; de Juan, J.; Tarjuelo, J. 2010a. Analysis of water application uniformity from a centre pivot irrigator and its effect on sugar beet (*Beta vulgaris L.*) yield. *Biosystems Engineering*. 105: 367- 379.
25. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; 2010b. Riego mecanizado: ensayos de uniformidad y eficiencia de los diferentes tipos de emisores. *In*: Seminario internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1°. 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 49–66.
26. Rodríguez, E.; Troncoso, J. 2005. Evaluación técnica y económica de un sistema de riego por pivote central. (en línea) *Agrosur*. 33: 62- 73. Consultado 30 set. 2017. Disponible en <http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0304-88022005000200006&script=sciarttext>
27. Rosas, J.; Ackermann, M.; Buonomo, M. 2014. Modelo de análisis para la evaluación privada de proyectos de inversión en riego: Una aplicación

estratégica a embalses en la cuenca hidrográfica del Rio San Salvador, Soriano. In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (3°. 2014, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 111- 128.

28. Sandri, D.; de Andrade, D. 2009. Parâmetros de desempenho de dezesseis equipamentos de irrigação por pivô central. *Ciência e Agrotecnologia*. 33(1): 271-278.
29. Solomon, K.; Kincaid, D.; Bezdek, J. 1985. Drop size distributions for irrigation spray nozzles. *Transactions of the ASAE*. 28(6): 1966–1974.
30. Tarjuelo, J. 1995. El riego por aspersión y su tecnología. Madrid, España, Mundi- Prensa. 491 p.
31. \_\_\_\_\_; Valiente, M.; Moreno, M.; Montero, J. 2014. Estrategias para la elección del equipo de pivot adaptado a las necesidades del productor. In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (3°. 2014, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 54-65.
32. Tornés, N.; Pujol, P.; Gómez, Y.; Boicet, T.; Cintra, L. 2009. Evaluación de la calidad del riego en máquinas eléctricas de pivote central del modelo o tipo “Ballama”. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 18(1): 55.
33. VÍctora, C.; Kacevas, A.; Fiori, H. 1999. Caracterización de suelos por erodabilidad (factor K de la EUPS) e infiltración con técnicas de lluvia simulada. Proyecto No. 45. In: Seminario Investigación Aplicada (2000, Las Brujas, Canelones, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. s.p.