



Tesis en opción al título de Ingeniero Agrónomo



TÍTULO: ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS MÁQUINAS DE PIVOTE CENTRAL
3, 11 Y 23 EN LA EMPRESA AGROPECUARIA HORQUITA.

Autor: Damián Pérez Díaz

Tutor: MSc Reinaldo Pérez Armas

Cienfuegos 2012
Año 54 de la Revolución

Pensamiento

La Agricultura es la única fuente constante, cierta y enteramente pura de riquezas.

José Martí

Dedicatoria

Dedico la realización de este trabajo a mis padres, hermanos e hijos, así como a todo el colectivo de trabajadores, profesores y amigos que me han ayudado durante toda mi carrera

Agradecimiento

Agradezco la colaboración del estado durante el desarrollo del trabajo a los compañeros ingenieros Julio K. Valero Vázquez y Reinaldo Pérez Armas quienes estuvieron siempre dispuestos a brindarme conocimientos y ayuda para, de esta forma lograr el rigor científico y la calidad que le corresponde a este trabajo, así como también a los compañeros operadores de las máquinas Western y Urapivot empleadas durante el trabajo.

Expresamos nuestro Agradecimiento especial a nuestra Revolución que nos ha proporcionado la oportunidad de realizar este estudio y graduarnos como ingeniero

RESUMEN

El trabajo se desarrolló en la Empresa Agropecuaria Horquita, en el periodo comprendido desde noviembre 2011 a febrero 2012 con el objetivo Situar las máquinas Western 3 y 11 y la Urapivot 22, en la Empresa Agropecuaria Horquita dentro de los parámetros de explotación con vista a elevar la calidad del riego y eficiencia del riego. Se caracterizó las máquinas a partir del catálogo del fabricante, se evalúa la pluviometría con dos mediciones en cada máquina y se procesa la información con el software pluviopivot, se evalúa la uniformidad del riego a partir de las categorías Área Regada Adecuadamente (ARA), Área Regada Excesivamente (ARE) y Área Regada Insuficientemente (ARI). Se obtiene como resultados: Las máquinas estudiadas cumplen con las normas del fabricante, las máquina Western 3 y Urapivot 22 efectúan el riego con mayor uniformidad al 20 % con 87.4 y 87.7 % respectivamente, mientras que para la Western 11 la regulación del 30 mostró el mayor coeficiente con 88,4 %; el mayor de todas las evaluaciones. Con regulaciones del 20 % para la Western # 3 y Urapivot # 22 y el 30 % para la Western # 11 se logró el mayor por ciento del área regada adecuadamente (ARA) con 66,67, 65,21 y 69,94 % respectivamente y es la Western # 11 la de mejores resultados de las tres evaluadas.

Introducción	1
I. Revisión Bibliográfica	4
1.1. Caracterización de las máquinas de riego de pivote central	4
Western y Urapivot	
1.1.1 Del riego rudimentario al riego tecnificado	4
1.1.2. Métodos y técnicas empleados para el riego	5
1.1.2.1. Riego superficial o por gravedad. Principios y técnicas	7
1.1.2.2. Riego por Localizado. Principios y técnicas	8
1.1.2.3. Método de Riego aéreo o por aspersión	11
1.1.3. Para la elección de un sistema pueden tenerse en cuenta las siguientes	13
1.1.3.1. Adaptabilidad del método. Ventajas e inconvenientes.	14
1.1.3.2. Las rampas giratorias o máquinas de pivote central.	18
1.2. Evaluación de las máquinas de pivote central 3,11 y 22	23
1.3. Uniformidad de aplicación del riego con máquinas de pivote central	27
2. Materiales y métodos	29
2.1. Localización y caracterización del suelo, el clima y el cultivo	29
2.2. Caracterización de las máquinas western 3, 11 y Urapivot 22.	31
2.3 Evaluación de la pluviometría de las máquinas	31
2.4 La eficiencia de la aplicación	32
3. RESULTADO Y DISCUSIÓN	35
3.1. Caracterización de las máquinas de riego Western 3 y 11 y Urapivot 22.	35
3.2. Evaluación de la pluviometría de las máquinas	38
3.3 Uniformidad de la aplicación	45
Conclusiones	
Recomendaciones	
Bibliografía	
Anexos	

INTRODUCCIÓN

Cuando en 1954 surge la primera plataforma giratoria de riego, el mundo estaba lejos de imaginar cuanto representaría ese novedoso ingenio para la agricultura y para la humanidad. Numerosos han sido los cambios ocurridos en la agricultura desde aquel entonces los que han propiciado la diseminación de esta técnica de riego por todo el mundo sobre los más diversos suelos y cultivo con los más disímiles modelos.

La sustitución de los aspersores por boquillas difusoras en los pivotes marcó una nueva etapa en el desarrollo del riego con un notable incremento en la uniformidad, la eficiencia de riego y un uso más racional de la energía (Lyle y Butter, 1990, Gilley y Mielke 1980, Sourell 1985, Bordousky *et al.* 1992, Tarjuelo 1999)

En Cuba, con más de tres décadas de experiencia en el uso de esta técnica, se ha avanzado en el conocimiento, explotación e incluso en la innovación, como la variación en la altura de las máquinas para adaptarlas a cultivos de diferentes portes, el cambio en los emisores o la sustitución de los sistemas hidráulicos por sistemas eléctricos para el desplazamiento de las máquinas. En esta dirección se ha llegado hasta la producción de máquinas en el país como la Fregat, que fue la primera, y luego la Ballama producidos ambos prototipos en la Ciudad de Bayamo. A partir de las ventajas reconocidas de esta técnica de riego el país ha destinado grandes sumas de dinero para asegurar el riego como vía imprescindible para garantizar la alimentación del pueblo, por lo que no ha escatimado esfuerzos en aras de potenciar esta técnica que ha permitido que en la actualidad se rieguen más de 25 000 hectáreas con máquinas de diferentes generaciones y modelos (IIRD, 2012).

A inicios del 1990 se valoró la necesidad transformar las viejas máquinas existente con aspersores de impacto en máquinas con boquillas difusoras de baja presión debido a la creciente necesidad del ahorro energético, del consumo de agua y de hacer más eficiente la labor de riego (Domínguez *et al.* 1998).

A pesar de la gran cantidad de dispositivos de emisión que abundan en el mercado internacional y de conocida efectividad en el riego, para desarrollar ésta tecnología sobre bases económicamente sustentables, era preciso lograr diseños de boquillas de producción nacional que se adecuaran a las condiciones propias del suelo y del cultivo del país y a un costo relativamente inferior que el de las importaciones.

Después de un estudio de laboratorio, Cárdenas *et al.* (1999), definieron que el prototipo de boquilla con el plato deflector estriado era el más adecuado para su fabricación y luego caracterizaron los parámetros hidráulicos fundamentales de dicho prototipo para iniciar la promoción seriada del primer modelo de boquilla difusora en el país. Posterior a ellos, Pérez *et al.* (2001), definieron la altura y el espaciamiento idóneos para colocar estas boquillas en un pivote cuyo resultado estuvo avalado por numerosas evaluaciones de campo. La transición hacia el riego de baja presión con el uso de estas boquillas ocurre en un momento en que los esfuerzos por la conservación de los recursos naturales (agua, suelo, energía) se acrecientan en la agricultura. Paralelo a este estudio comenzaron a introducirse en el país máquinas de riego cada vez más modernas con dispositivos de emisión mucho más eficientes como las boquillas difusoras y rotadores (conocidos en el mercado por su nombre en inglés: rotators).

La uniformidad de aplicación del riego es un parámetro que está muy relacionado con eficiencia del riego y con la producción de los cultivos y los rendimientos por unidad de área. Históricamente la falta de uniformidad de los sistemas de riego se ha compensado con el incremento de los volúmenes de agua a aplicar y del número de riegos, con la consecuente e innecesaria disminución de los intervalos entre cada aplicación. Sin embargo, esta práctica puede producir elevado consumo agua, fertilizantes y la contaminación de los mantos acuíferos, problemas de drenaje, la sobreexplotación de los equipos y el incremento de los costos de la actividad por el uso excesivo de los recursos como el agua y la fuerza de trabajo. Por ello resulta menos aconsejable la utilización de riego excesivo para suplir la ineficiencia de los sistemas, aún cuando esto constituye una práctica habitual entre los regadores.

La Empresa Agropecuaria Horquita ha sido testigo del cambio relativamente frecuente de las máquinas de riego desde las DDA-100MA hasta las actuales Western y Urapivot

Con la modernización de los pivotes se pensó desde un inicio por muchos productores, que el uso de emisores de baja presión sería suficiente para obtener riegos con alta uniformidad. Sin embargo en la práctica los incrementos de uniformidad no han saciado las expectativas y aún se desconoce el comportamiento real de estas nuevas máquinas en la Empresa Agropecuaria Horquita lo que no llevó a plantearnos el siguiente Problema científico:

Problema científico

¿Cuál será comportamiento de los parámetros de explotación de las máquinas de pivote central Western 3 y 11 y la Urapivot 22, en la Empresa Agropecuaria Horquita?

Una vez formulado el problema nos planteamos como hipótesis

Hipótesis: La determinación de los parámetros de explotación de las máquinas Western 3 y 11 y la Urapivot 22 de la Empresa Agropecuaria Horquita, permitirá elevar la calidad del riego y eficiencia del riego.

Para comprobar la anterior hipótesis nos planteamos el siguiente objetivo general

Objetivo general:

Situar las máquinas Western 3 y 11 y la Urapivot 22, en la Empresa Agropecuaria Horquita dentro de los parámetros de explotación con vista a elevar la calidad del riego y eficiencia del riego.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar las máquinas de riego Western 3 y 11 y Urapivot 22 en la Empresa Agropecuaria Horquita.
2. Evaluar la pluviometría de las máquinas Western 3 y 11 y la máquina Urapivot 22 de la Empresa Agropecuaria Horquita.
3. Evaluar la uniformidad del riego de forma cualitativa en las máquinas Western 3 y 11 y la máquina Urapivot 22 de la Empresa Agropecuaria Horquita.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Aplicar agua a los cultivos es una labor cada vez más imprescindible con el objetivo de complementar las necesidades de los cultivos que la lluvia no asegura y con ello satisfacer las demandas de alimentos de una población cada vez más creciente.

Las tecnologías del riego también han avanzado mucho y han permitido llegar a sistemas muy tecnificados liderados por las máquinas de pivote central, que requieren de su pleno conocimiento por los que con él operan a fin de garantizar la adecuada explotación.

Las máquinas de riego han llegado ya a la plenitud de su desarrollo mecánico. Ahora evolucionan hacia la mejora de la eficiencia. Los nuevos diseños se enfocan principalmente a los emisores. El objetivo es encontrar emisores que trabajen a baja presión, que tengan un gran alcance y que sean poco afectados por el viento (Pérez, 2004).

1.1. Caracterización de las máquinas de riego de pivote central Western y Urapivot

1.1.1 Del riego rudimentario al riego tecnificado

Investigaciones arqueológicas han encontrado evidencias de las primeras manifestaciones de riego en Mesopotamia y Egipto que datan desde el siglo VI a.n.e. donde la cebada era sembrada en lugares con niveles de precipitaciones insuficientes para satisfacer al cultivo.

En un valle de las montañas de Los Andes, en Perú; fueron encontrados restos de tres canales de riego que según las pruebas realizadas fueron construidos en los siglos IV y III a.n.e. y del IX de nuestra era. Estos canales constituyen las más antiguas muestras de riego en el llamado nuevo mundo. (Dillehay, *et al.*, 2005). Son estos los primeros indicios del origen del riego, el que tuvo un desarrollo lento hasta que en siglo XX se comenzaron a emplear los motores de combustión interna y eléctricos para esta actividad lo que permitió extraer el agua de las profundidades de los acuíferos o impulsarla a grande distancias favoreciendo de

manera directa el desarrollo del riego que avanzaba día a día y se extendía por todo el mundo.

En Cuba las primeras construcciones empleadas para la práctica de riego han sido identificados al sur de Güines, provincia de Mayabeque en el río de igual nombre donde se construyeron un grupo de zanjias derivadoras de agua procedentes del mencionado afluente para llevarlos hasta las fincas de los colonos más importantes asentados en la zona; aquí llegó a crearse una organización llamada Comunidad de regantes del Mayabeque cuyo objetivo fue resolver los problemas creados con el agua y establecer un orden en esta actividad.

Son también las construcciones sobre pozos profundos en Horquita otra de las primeras manifestaciones del riego en Cuba, (García, 1996). En ambos casos aún se preservan elementos que testifican tales afirmaciones.

El riego ha aumentado notablemente la extensión de tierra cultivable y la producción de alimentos en todo el mundo, de 1. 8 millones de hectáreas de regadío aumentó a 4.1 millones en el 1900 y a 15 millones en 1950, con ello se alcanzó el 15% de la tierra cultivable en el mundo.

1.1.2. Métodos y técnicas empleados para el riego

De acuerdo a la forma general en que se hace llegar el agua a la planta se distinguen los siguientes métodos de riego (Pacheco, et. Al., 2006):

-  Método superficial o por gravedad
-  Método aéreo o de aspersión
-  Método localizado
-  Método subterráneo u osmótico

Al primero de ellos corresponden las técnicas de surcos, inundación (también llamadas Terrazas y tazas) y las bandas

En el caso del método aéreo o de aspersión existen diferentes clasificaciones de las técnicas que lo integran, siendo la más aceptada la que las agrupa en: Aspersores o rociadores y máquinas aspersoras.

El método localizado está integrado por las técnicas: Goteo, Microaspersión (microjet), cintas de exudación, microtubos.

Al método subterráneo pertenecen las zanjas laterales, tuberías perforadas y riego desde zonas elevadas

El uso de un método de riego u otro depende de numerosos factores (El regante, 2011), entre los que es preciso destacar los siguientes:

- La topografía del terreno y la forma de la parcela.
- Las características físicas del suelo, en particular las relativas a su capacidad para almacenar el agua de riego (hidrofísicas).
- Tipo de cultivo, del que es imprescindible conocer sus requerimientos de agua para generar producciones máximas, así como su comportamiento en situaciones de falta de agua.
- La disponibilidad de agua en la fuente y sus fluctuaciones.
- La calidad del agua de riego.
- La disponibilidad de la mano de obra y su capacitación.
- El coste de las instalaciones de cada sistema de riego, tanto en lo que se refiere a inversión inicial como en la ejecución de los riegos y mantenimiento del sistema.
- El efecto en el medio ambiente.

En Cuba se emplea una amplia gama de las técnicas conocidas para el riego en consonancia con los aspectos antes mencionados e incluyendo los aspectos económicos que hace imposible avanzar hacia cambios tecnológicos de forma rápida, razón esta que explica por qué a pesar de la plena conciencia de las ventajas en todas las dimensiones de técnicas como las máquinas de pivote central, el goteo o la microaspersión localizada, aún sigue siendo el riego superficial o por gravedad la técnica más utilizada.

Tabla 1: Área de riego por técnica. (IIRD, 2012)

Concepto	Área (ha)
Áreas Totales	491.249,3
Aspersión Portátil	27.837,5
Aspersión Semiestacionaria.	50.772,1
Fregat	4.918,6
Volzhanka.	786,0
Pívot Eléctrico	20.671,5
Goteo	18.155,3
Microaspersión (Localizado)	9.547,8
Gravedad con bombeo	189.595,5
Gravedad sin bombeo	162.195,4
Otras Técnicas	6.769,4

1.1.2.1. Riego superficial o por gravedad. Principios y técnicas:

Es el más tradicional y fue el más usual hasta finales del siglo XIX en que se inventó el riego localizado. Fue también primero que surgió y al que la humanidad le debe mucho. Su tendencia actual es a ser sustituido por otras técnicas ya que sus mayores inconveniencias son: el despilfarro de agua que lleva consigo y las afectaciones al suelo por erosión y compactación. Es muy significativo el dato de que las pérdidas de agua originadas sólo por evaporación, en largos recorridos y a

cielo abierto, se estima en aproximadamente un 25%; sin contar las filtraciones incontroladas, roturas de conductos etc.

El agua procedente de la fuente de abasto, llámese embalse, río o centros de almacenamiento discurre a través de grandes canales hasta los centros de distribución que repartirán por canales medianos y pequeños hasta llegar a la parcela objeto del riego donde llegará por gravedad. La pericia del buen labrador, y su experiencia, harán que el reparto de agua, por medio de tablillas o piedras con barro, sea el adecuado. Nadie como él conoce la capacidad de filtrado de su suelo hasta llegar a punto de saturación y, nadie como él sabe aprovechar el caudal que recibe sólo por un tiempo determinado. Evidentemente este primitivo método también ha evolucionado y en las grandes superficies dedicadas a cultivos más industrializados, es impensable un riego de estas características que no vaya precedido por un estudio técnico de los marcos de campesinos más adecuado según el tipo de cultivo, porosidad del suelo, temperatura según la estación meteorológica etc.

1.1.2.2. Riego por Localizado. Principios y técnicas:

Este método de riego relativamente joven se distingue entre otros elementos por la localización de la entrega del agua no humedeciendo toda la superficie del suelo como sus antecesores. Es un método que se adapta perfectamente a las reales exigencias actuales de reducir el uso de agua sin comprometer los rendimientos y las producciones agrícolas

Al aplicar el agua por este método se forma un bulbo húmedo debajo de cada emisor. Los emisores de riego localizado aplican el agua sobre el suelo donde se forma un pequeño charco. A medida que avanza el riego, el bulbo húmedo se hace cada vez más grande, pero a su vez el suelo se humedece más, la velocidad de infiltración disminuye y con ello el bulbo húmedo aumenta su tamaño más despacio.



Figura 1. Formación del bulbo húmedo con el riego localizado

Riego por goteo. Es el sistema de riego localizado más popular. El agua circula a presión por la instalación hasta llegar a los goteros, en los que se pierde presión y velocidad, saliendo gota a gota. Son utilizados normalmente en cultivos con marco de plantación amplio, cultivo en invernadero (tomate, pimiento, pepino, melón, ornamentales), y en algunos cultivos en línea (Plátano, caña, frutales, etc).

Los goteros suelen trabajar a una presión de aproximadamente 1 kg/cm^2 conocido popularmente por kilo y suministran caudales entre 2 y 16 litros/horas. Lo mas frecuente es que las tuberías laterales y los goteros estén situados sobre la superficie del suelo, y el agua se infiltre y distribuya en el subsuelo. Es el riego por goteo en superficie. En ocasiones las tuberías laterales se entierran entre 20 y 70 cm. y los goteros aportan el agua a esa profundidad, conociéndose entonces como riego por goteo subterráneo. La profundidad de enterrado del porta goteros dependerá del tipo de cultivo y del tipo de suelo. Este sistema esta basado en la utilización de franjas de humedad que garantizan una buena uniformidad de riego.

Riego por microaspersión o microjet:

En esta técnica, el agua se aplica sobre la superficie del suelo en forma de lluvia muy fina, mojando una zona determinada que depende del alcance de cada emisor. Está indicado tanto para cultivos leñosos como para cultivos herbáceos de distinto marco de plantación.

Se distinguen los emisores denominados microaspersores y los denominados microdifusores. En ambos casos suelen trabajar a presiones entre 1 y 2 kg/cm² y suministran caudales de hasta 200 l/h.

Riego por tuberías emisoras

Se caracteriza por la instalación de tuberías emisoras sobre la superficie del suelo creando una banda continua de suelo humedecido y no en puntos localizados como en el riego por goteo. Su uso mas frecuente es en cultivos en línea con muy poca distancia entre plantas. Las más utilizadas son las tuberías goteadoras y las tuberías exudantes.

Se utiliza en plátano, cítricos, casas de cultivo ya que reúne una serie de ventajas y desventajas

Ventajas del riego localizado:

Ahorro de agua: dado por la posibilidad de controlar fácilmente la lámina de agua aplicada, la reducción de la evaporación directa, la ausencia de escurrimiento, el aumento de la uniformidad de aplicación al reducir la filtración profunda o percolación.

Mayor rendimiento y mayor calidad de frutos

Ahorro de trabajo y de fuerza de trabajo

Menos manifestación de las plantas indeseable y facilita su control.

Se pueden emplear fuentes de abasto de pequeño caudal.

Permite la aplicación de fertilizantes y otros productos junto con el agua

Desventajas del riego localizado:

Peligro de taponamiento de los emisores

Gran inversión inicial.

Desarrollo radicular limitado.

Necesita fuerza de trabajo calificada.

1.1.2.3. Método de Riego aéreo o por aspersión:

Es aquel tipo de riego que trata de imitar a la lluvia. Es decir, el agua destinada al riego se hace llegar a la planta por medio de tuberías a presión y unos dispositivos especiales llamados aspersores son los encargados de la entrega quienes la lanzan al aire para que luego caiga pulverizada o en forma de gotas sobre la superficie que se desea regar.

El proceso de aplicación de agua de un aspersor consiste en que el chorro de agua a gran velocidad sale a través de una boquilla que posee divisiones que particionan el agua la que se difunde en el aire en un conjunto de gotas, distribuyéndose sobre la superficie del terreno, con la pretensión de conseguir un reparto uniforme entre varios aspersores.

Como efectos derivados de esta aplicación están:

- La relación entre la velocidad de aplicación (pluviometría del sistema) y la capacidad de infiltración de agua del suelo, produciéndose escorrentía si la primera supera a la segunda.
- El posible deterioro de la superficie del terreno por el impacto de las gotas si estas son muy grandes, y su repercusión en la infiltración, formación de costra, erosión etc.
- La uniformidad de distribución en superficie y su gran dependencia de la acción del viento tanto por la velocidad como por la dirección.
- La redistribución dentro del suelo por diferencias de potencial hidráulico a distancias entre 1 y 3 m, que mejora sensiblemente la uniformidad real del agua en el suelo.

La aplicación uniforme del agua depende principalmente del “*modelo*” de reparto de agua del aspersor, así como de la disposición y espaciamiento de los aspersores en el campo (*marco de riego*).

A estos factores pueden añadirse otros de menor trascendencia como la altura del aspersor sobre el terreno, la presencia o no de vaina prolongadora de chorro (VP), que mejora la uniformidad de reparto de agua para velocidades de viento mayores de unos 2 m/s, o la *duración del riego*, cuyo incremento favorece a la Uniformidad

de Distribución (UD) por compensarse en parte las distorsiones producidas por el viento ya que este varía normalmente con el tiempo.

En riegos de media o alta frecuencia, la falta de uniformidad en un riego como consecuencia de la acción del viento puede verse compensada en los riegos sucesivos al ir cambiando normalmente las condiciones del viento. Esta mejora de uniformidad acumulada de varios riegos será más aprovechable por el cultivo cuanto mayor sea la frecuencia de riego ya que de este modo serán menores los déficit hídricos transitorios existentes entre riegos.

Clasificación de los sistemas de aspersión

Los sistemas de riego por aspersión pueden agruparse en dos grandes familias: los estacionarios, que permanecen fijos mientras riegan, y los de desplazamiento continuo mientras realizan la aplicación del agua.

Dentro de la primera familia están los sistemas móviles, donde todos los elementos de la instalación son móviles, incluso puede serlo la bomba también.

Los sistemas semifijos suelen tener fija la red de tuberías principales, que normalmente va soterrada, y las tomas o hidrantes, donde se conectan los ramales de riego, que son móviles. Estos ramales de riego pueden llevar directamente acoplados los aspersores o bien ir dotados de mangueras, que desplazan los aspersores sobre “patines” a una determinada distancia del lateral (30 a 45 m), pudiéndose realizar varias posiciones de riego sin necesidad de cambiar la tubería. Existe otra variante en la que todas las tuberías son fijas, desplazándose únicamente los tubos porta-aspersores y los aspersores.

Los sistemas fijos permanentes mantienen todos sus elementos fijos durante la vida útil, lo que implica que todas las tuberías tengan que estar soterradas, mientras que los sistemas fijos temporales hay que montarlos al principio de la campaña de riego y retirarlos al final de la misma, lo que implica que los ramales y sus tuberías de alimentación tengan que estar en superficie, pudiendo ser de aluminio o de PVC.

1.1.3. Para la elección de un sistema pueden tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los sistemas de baja presión, que permitan el riego nocturno (por menor evaporación, velocidad de viento y coste energético), y sean de fácil manejo y automatización. En este sentido uno de los sistemas más interesantes son los pivots o pivotes.
- Para parcelas pequeñas o de forma irregular se adaptan mejor los sistemas fijos.
- Los sistemas semifijos de tubería móvil se están utilizando cada vez menos, a pesar de ser los que requieren menor inversión, por las mayores necesidades de mano de obra, incomodidad de manejo y peor calidad del riego, siendo más utilizados los sistemas fijos.
- Los laterales de avance frontal son muy adecuados para parcelas rectangulares de gran longitud, consiguiendo una alta uniformidad de riego con baja presión, pero requieren mayor inversión que los pivotes y tienen un manejo más complicado. Una variante que parece muy interesante son los laterales de tamaño medio (inferiores a 300 - 350 m) que pueden regar con movimiento frontal o en círculo, teniendo la ventaja de su gran movilidad y adecuación a parcelas con forma más o menos irregular.
- Las alas sobre carros son también sistemas interesantes por su gran movilidad y adecuación a diferentes condiciones de parcelas y cultivos, permitiendo la utilización de la baja presión, por lo que están sustituyendo en algunos casos a los aspersores gigantes (cañones), por sus problemas de elevada presión de trabajo, gran tamaño de gota, mayor distorsión por el viento, etc. No obstante, los cañones de riego requieren menor inversión que las alas sobre carro y son de más fácil manejo, lo que esta limitando en la práctica el uso de las alas sobre carro.

La experiencia acumulada durante años en la explotación de los sistemas de riego por aspersión han trazado el camino a seguir en aras de perfeccionar este método por lo que las tendencias actuales se centran en:

- La utilización de la baja presión, donde el adecuado diseño de los emisores juega un papel fundamental, debiendo tender a que tengan el máximo alcance y un tamaño de gota medio (entre 1,5 y 4 mm), lo que reduce la distorsión originada por el viento (y su efecto sobre la uniformidad de aplicación de agua) y las pérdidas por evaporación y arrastre por el viento.
- La optimización del diseño y el manejo (programación de riegos) para reducir la inversión, alcanzar altas eficiencias de aplicación y ahorrar agua y energía. Esto va ligado normalmente a un importante apoyo informático.
- La automatización parcial, y en algún caso total, que facilite el manejo de la instalación y el riego nocturno, con menor coste energético y menores pérdidas de agua en la aplicación, unido normalmente además a vientos menos intensos.

1.1.3.1. Adaptabilidad del método. Ventajas e inconvenientes.

Las ventajas del riego por aspersión se derivan principalmente de dos aspectos fundamentales:

- El control de riego sólo está limitado por las condiciones atmosféricas (pérdidas por evaporación o arrastre y efecto del viento sobre la uniformidad de reparto).
- La uniformidad de aplicación es independiente de las características hidrofísicas del suelo.

Una enumeración de las principales ventajas puede ser:

- 1- Puesto que la dosis (norma) de riego únicamente es función del tiempo de cada posición, puede adaptarse tanto a dosis grandes como a dosis pequeñas.
- 2- Al poder modificar fácilmente la pluviometría es capaz de adaptarse a terrenos muy permeables (más de 30 mm/h,) o muy impermeables, e incluso a terrenos con características heterogéneas.
- 3- No necesita nivelaciones, adaptándose a topografías onduladas. Esto permite conservar la fertilidad natural del suelo.
- 4- Facilita el trabajo de la maquinaria. Únicamente en el caso de sistemas con tuberías en superficie durante la campaña de riegos dificultaría esta mecanización.

- 5- Se adapta a diferentes rotaciones de cultivos, con la condición de que el dimensionamiento se realice para el cultivo más exigente, ya que la cantidad de agua a aplicar sólo está en función del tiempo por posición una vez dimensionada la instalación.
- 6- Dosifica de forma rigurosa los riegos ligeros, lo cual es importante en la etapa de germinación o brotación por la posibilidad de ahorrar agua.
- 7- Pueden conseguirse altos grados de automatización, con el consiguiente ahorro de mano de obra, a costa normalmente de una mayor inversión.
- 8- En algunas modalidades permite el reparto de fertilizantes y tratamientos fitosanitarios.
- 9- Evita la construcción de zanjas y canales, aumentando la superficie útil, a la vez que es más cómodo y de más fácil manejo que el riego por superficie.
- 10- Es el método más eficaz para el lavado de sales por originar un movimiento de agua en el suelo en subsaturación, obligándola a circular por los poros más pequeños y por tanto más en contacto con la solución del suelo. Como principal inconveniente en este sentido está el hecho de que la energía empleada en la aplicación encarece la operación.

Las principales desventajas atribuibles a este método de riego son:

- ❖ El posible efecto de la aspersión sobre plagas y enfermedades.
- ❖ Interferencias sobre los tratamientos, por el lavado de los productos fitosanitarios que protegen la parte aérea del cultivo. Es preciso establecer la programación de riegos adecuada para evitar estas interferencias.
- ❖ Puede originar problemas de salinidad en la parte aérea del cultivo cuando se utilicen aguas salinas o residuales para regar, ya que al evaporarse aumenta la concentración de sales o impurezas en la misma.
- ❖ Mala uniformidad en el reparto de agua por la acción de fuertes vientos.
- ❖ Altas inversiones iniciales y los elevados costos de mantenimiento y funcionamiento (energía).

Es oportuno señalar que las ventajas o desventajas no son tales mientras no se demuestre que la relación beneficio-costos del proyecto de aspersión sea superior o inferior a la obtenida con otras alternativas.

Para conseguir un buen riego por aspersión son necesarios

- Presión en el agua que haga funcionar adecuadamente a los emisores con el tamaño de las gotas adecuado al suelo y el cultivo:
- Una estudiada red de tuberías adecuadas a la presión del agua en cuanto a diámetro y longitud.
- Emisores adecuados que sean capaces de esparcir el agua a presión que les llega por la red de distribución.
- Depósito de agua que se conecte con la red de tuberías

Presión de agua: es necesaria por dos motivos: La red de distribución se multiplica en proporción a la superficie que debemos regar y teniendo en cuenta que el agua debe llegar al mismo tiempo y a la misma presión a las bocas donde se encuentran instalados los mecanismos de difusión (aspersores) con el fin de conseguir un riego uniforme. La segunda razón es que la presión de agua debe ser capaz de poner en marcha los aspersores al mismo tiempo, bien sean fijos o móviles, de riego más pulverizado o menos meloso (1974).

En el caso de que la presión de la red no sea suficiente se deberá instalar un motor que asegure la presión suficiente desde el depósito hasta los aspersores, para vencer todas las resistencias que durante todo el trayecto se oponen al movimiento del agua y hagan funcionar correctamente a estos dispositivos emisores.

Red de tuberías: En general la red de tuberías que conducen el agua por la superficie a regar se compone de ramales de alimentación principal que conducen el agua para suministrar a los ramales secundarios que conectan directamente con los aspersores

Todo esto supone un estudio técnico adecuado ya que de él dependerá el éxito de la instalación.

Aspersores: Los más utilizados en la agricultura son los giratorios porque giran alrededor de su eje y permiten regar una superficie circular impulsados por la presión del agua, aunque en el mercado las hay de variadas funciones y distintos alcances. Son parte muy importante del equipo de riego por aspersión y por tanto el modelo, tipo de lluvia más o menos pulverizada que producen, alcance, etcétera deben formar parte del estudio técnico antes mencionado.

En los últimos años se ha generalizado en el mundo la utilización de boquillas que trabajan entre 10 y 18 m c a (metros de la columna de agua) ahorrando considerablemente energía. El modelo Spray es un emisor fijo de baja presión donde el agua al salir por la boquilla choca contra el plato estático que está ranurado formando un chorro de agua a una presión que oscila entre 4 y 18 m c a

Existe varios tipos de platos que pueden proporcionar diferentes chorros de salida de agua (chorros finos, chorro medianos y chorro fuertes) debido a que la entrega de agua es fija, la aplicación instantánea es alta y se recomienda en suelos de poca pendiente y alta velocidad de infiltración.

La última tecnología disponible en el mercado internacional es el rotatorio, sólo gira a una velocidad lenta debido a un freno en el plato y necesita una presión de operación superior, tiene un radio de alcance de más de 8 m, riegan con una gota más grande y maneja el viento mejor que todos los emisores, presenta un coeficiente de uniformidad superior al 86%

Existen dos tipos de dispositivos para mantener constante la descarga de un emisor ya que la presión de la boquilla varía cuando el pivote gira sobre una elevación más alta o más baja el dispositivo utilizado en la máquina es auto regulador de presión el cual es un resorte que regula automáticamente la presión debajo del emisor.

Depósito del agua: Desempeña dos funciones: la de almacenamiento de agua suficiente para uno o varios riegos y la de ser punto de enlace entre el agua sin presión y el motor de impulsión de esa agua a la presión necesaria para el riego calculado.

1.1.3.2. Las rampas giratorias o máquinas de pivote central.

Las máquinas de pivote central, Definidas según Tarjuelo (1999) como ramales autodesplazables, donde el agua es aplicada a través de emisores localizados sobre o bajo una tubería elevada (aspersores de alta presión tipo impacto, de media presión tipo spray, wobblers, rotadores, spiners y de baja presión, LDN y LEPA). La tubería se divide en tramos, que son soportados por un número variable de torres automotrices que se desplazan en círculo sobre el terreno, alrededor del punto fijo denominado punto pivote (Martínez, Sánchez y Serrano, 2001). Este último integra el tablero de comando, la interconexión hidráulica proveniente del sistema de impulsión y las de suministro eléctrico que permiten el accionamiento de toda la unidad

Llamadas también como rampas giratorias fueron inventadas en los Estados Unidos en el estado de Nebraska en 1949, este sistema permite el riego en círculos de gran radio prácticamente sin mano de obra, utilizándose una cantidad muy pequeña energía hidráulica o eléctrica para mover al equipo, efectúan el riego en movimiento. Un ejemplo de estos equipos son las llamadas máquinas Fregat.

Las rampas giratorias se han ido perfeccionando y evolucionando y en la actualidad se utilizan más la de proporción por energía eléctrica mientras las de energía hidráulica son cada vez menos usadas. Otros avances que se observan actualmente en estas máquinas es la sustitución de los aspersores de impactos por boquillas, de las que existe una gran variedad de modelos; a las máquinas se

le han hecho modificaciones como un brazo final que se extiende en las esquinas de los campos para evitar los realengos

Ventaja y desventajas de las rampas giratoria ó máquina de riego por aspersión (Allen *et al*, 2000)

Ventajas

- Permite un mayor control de riego.
- La obtención de una mayor uniformidad en la lámina de agua.
- Permite control fácil e inmediato de la precipitación aplicada en cada riego
- Es un sistema de alta frecuencia.
- Permite ahorros de la mano de obra o fuerza de trabajo.
- Permite el fertirriego.
- Brinda posibilidades de automatización total.
- Puede atender varios cultivos a la vez con diferentes normas de riego

Desventaja de las rampas giratoria:

- Alto costo inicial por la compra del equipo.
- Consume alta cantidad energía.
- Es un equipo complejo que requiere personal especializado.
- Realiza riego circular, dejando relengos.
- Se necesita área libre de obstáculo para su explotación.

Estas desventajas pueden ser minimizadas o contrarestadas con los incrementos de los rendimientos que generarán los cultivos atendidos con este sistema lo que permitirá recuperar con rapidez los costos de la inversión y los gastos de energía.

Una adecuada y sistemática preparación y capacitación del personal que operará con el sistema ayudarán a que lo conozca, lo evalúe y lo explote de manera eficiente. En cuanto a la problemática de los campos circulares y los realengos que la máquina deja se ha trabajado en modificaciones a la máquina que han incluido el acoplamiento de un brazo flexible al final, como si fuera un doble pívot, pues al acercarse a las esquinas se despliega el brazo y luego se recoge. Hay otras variantes como regar estas pequeñas áreas con sistemas portátiles o con sistemas de gravedad

Requisitos que se precisa conocer para el montaje de un sistema de máquinas de riego de pivote central.

- ❖ Conocer el tipo de suelo.
- ❖ Disponibilidad de agua que existe y si esta garantiza los requerimientos de la máquina (buena fuente de abasto)
- ❖ Disponibilidad de redes eléctricas.
- ❖ Conocer el o los cultivo(s) que se va(n) sembrar. Qué norma de riego necesita el cultivo más exigente en el caso de una rotación de cultivos, para decidir la capacidad máxima que se exigirá al sistema.

Una de las modificaciones más importantes realizadas en esta máquinas fue la colocación de la boquillas difusoras en lugar de los aspersores de impacto, la que ha ido desarrollándose para alcanzar una mayor calidad en el riego ya que disminuye considerablemente la rotura y permite riego con carga de trabajo menores, pudiéndose disminuir la presión hasta dos atmósfera, lográndose un ahorro de 20 % de consumo de combustible, además una mayor uniformidad y homogeneidad de riego.

Los sistemas de pivote central son diseñados para ser operados continuamente durante la temporada crítica de consumo de agua de los cultivos.

En nuestro país se introdujeron estos sistemas en 1977 beneficiándose 469. 7 ha, diez años después ya existían 209 máquinas regando 3 247. 64 hectáreas y en los finales de los 80 y principios de 90 se llegó a operar 1 200 máquinas.

Uno de los elementos más importantes que se tienen en cuenta en el diseño de estas máquinas es la separación entre las torres la que varía de acuerdo a los diferentes tipos de máquinas y modelos. Por lo general la separación mínima son de orden de los 25 metros y la máxima 75 metros aunque es frecuente encontrar las de 30 metros y 38 metros, por ejemplo la firma VALLEY en el modelo 8120 utiliza tramos entre 43 y 60 metros, igual ocurre con las máquinas Western que tienen tramos de 60 m. Los modelos de tramos largos resultan más económicos debido a que la torre es uno de los elementos más costosos del sistema.

Estas máquinas logran relativamente altas uniformidades de aplicación de agua debido al movimiento continuado del sistema de aspersión, logran hacer buenos manejos del riego y aplicaciones oportunas del agua, fertilizantes y otros productos químicos, amplios rangos de intensidades de aplicación que se traduce en aplicación de diferentes láminas de riego a través del ciclo fenológico del cultivo, aplicación rápida de láminas ligeras de riego las cuales son beneficiosas en la germinación de las semillas (González, 2005).

La pluviometría crece desde el centro hasta el extremo ya que cada metro de lateral tiene que regar mayor superficie en el mismo tiempo. Todos los puntos tienen que recibir la misma cantidad de agua por lo que la pluviométrica tienen que ser muy elevada (Tarjuelo, 1999) y (García, 1996).

La uniformidad depende del tipo de emisor, de la presión y caudal de trabajo por lo cual es indispensable mantener una presión casi constante entre primero y el último emisor y la diferencia de presión permisible se encuentra entre un 10 % y un 20 %. Las condiciones atmosféricas, principalmente el viento influyen grandemente sobre la uniformidad de distribución de la lluvia, produciendo lo que se conoce como efecto del viento que aumenta en relación directa con la velocidad del mismo.

La aplicación de este tipo de riego en el cultivo de la papa ha sido muy beneficiosa en nuestro país lográndose grandes rendimientos, ya que la papa es una vianda de gran demanda en nuestra población y se ha incrementado notablemente pasando de un cultivo local de pequeña parcela, a un cultivo intensivo plantándose anualmente más 17 500 ha (Aragón, 1994).

El cultivo de la papa puede desarrollarse en Cuba solamente con la aplicación del riego debido a las características de nuestro clima, donde tanto la temperatura que se manifiesta durante los meses apropiados para cultivo como la cantidad de lluvia caída en este periodo, no satisfacen sus requerimientos mínimos, de ahí la

necesidad de suministro de agua como termorregulador y como transporte de los nutrientes hacia el interior de la planta.

Más de 90% de las áreas plantadas de papa en nuestro país cuentan con riego por aspersión. Durante el ciclo vegetativo del cultivo la demanda de agua puede dirigirse en tres etapas la primera va desde la brotación hasta los 45 ó 50 días siendo este periodo el de menor demanda en esta etapa se produce un desarrollo vegetativo y el inicio de la tuberización a partir de los 50 días la planta manifiesta una mayor demanda de agua por lo que es necesario aumentar la norma de riego en esta fase se produce el engrosamiento del tubérculos. A partir de los 80 días la necesidad de agua de cultivo declina, coincidiendo con la maduración del fruto. Los intervalos de riego no son rígidos, depende del volumen de la lluvia caída de la evapotranspiración y la etapa fenológica del cultivo y oscila entre 4 y 6 días.

La utilización de este tipo de riego en la Empresa Agropecuaria Horquita ha permitido obtener rendimientos superiores a 22 t/ha para este cultivo. Siendo la campaña 1996 y la del 2006 la más productivas.

Las máquinas Western y Urapivot

Las máquinas de pivote central Western y Urapivot son sistemas de riego de reciente incorporación a nuestras áreas agrícolas y que rápidamente se han ido extendiendo por todo el país dadas sus ventajas respecto a los sistemas precedentes.

Según los proveedores se considera que a las ventajas antes señaladas para las máquinas de pivote central a estas se les atribuye otras más.

- **Menos desplazamientos, mayor ahorro de tiempo y dinero.**

Actualmente es el sistema de riego más eficiente del mundo.

Requiere poca mano de obra o ninguna, dado que puede ser totalmente automatizado y programable.

- **Mayor Seguridad y Control sobre tu cultivo.**

Con el nuevo e innovador Sistema UraPocket, de manera rápida y sencilla puede dar órdenes a su pivote, desde una PDA o PC, y comprobar su estado en cada momento.

- **Mayor Productividad.**

- Una optimización excelente del riego en los cultivos.
- Una uniformidad del riego cercana al 90%.
- Se logra un control perfecto de la dosis específica a aplicar.

- **Garantiza sus beneficios temporada tras temporada.**

Los sistemas Urapivot siguen un proceso de fabricación por el cual garantiza una vida útil de 20 años, siguiendo un adecuado mantenimiento por parte de su distribuidor, para garantizar un perfecto funcionamiento de la máquina.

1.2. Evaluación de las máquinas de pivote central 3,11 y 22

La evaluación técnica de una máquina de pivote central, considera entre otros aspectos, la determinación de dos coeficientes que reflejan la calidad del riego y que se asocian a la uniformidad del cultivo (Rodríguez y Troncoso, 2005). Estos son la Uniformidad de Distribución, indicador de la magnitud de los problemas en el proceso de aplicación de agua y el Coeficiente de Uniformidad de Heerman y Hein. Este último, corresponde a una modificación del Coeficiente de Christiansen, donde cada pluviómetro representa una corona circular de área creciente a medida que se aleja del punto pivote (Hermann y Hein, 1968).

La evaluación de las máquinas de riego de pivote central, resulta necesaria para conocer con exactitud el comportamiento real de los parámetros de funcionamiento y con ello decidir el régimen más adecuado para su operación. Generalmente, un conjunto de evaluaciones pluviométricas proporcionan la información necesaria para interpretar el funcionamiento de la máquina, relacionándola con otros elementos que afectan la uniformidad del riego como la velocidad y dirección del viento, la temperatura, la humedad del aire, la altura de la boquilla o emisor, el grado de desarrollo del cultivo, entre otros.

En una evaluación pluviométrica se pueden utilizar un número relativamente grande de recipientes denominados pluviómetros, los que estarán espaciados de

manera regular, en una misma dirección y tendrán características homogéneas. La evaluación proporciona gran cantidad de información que de manera aislada no permite hacer una adecuada interpretación y mucho menos adoptar decisiones sobre cómo regar.

La introducción de un factor de ponderación que tenga en cuenta la posición relativa del pluviómetro respecto al pivote y que se corresponde con la superficie que cada uno representa, le da mayor exactitud a los valores tanto de uniformidad, de distribución y de la lluvia media que se obtienen al evaluar la pluviometría de la máquina teniendo en cuenta que estarán ponderados por el factor de superficie. Esto es posible cuando se emplea para procesar la información de la lluvia recolectada por los pluviómetros con el software Pluviopivot, el cual guarda en un fichero los datos sistematizados y los resultados del análisis (Pacheco, 2006).

La pluviometría en las máquinas de pivote central resulta más complejo que en otros sistemas de aspersión, porque la corona circular representada por cada pluviómetro es mayor en la medida que su posición se aleja del pivote. Luego, el peso relativo de los diferentes pluviómetros en el cálculo de los parámetros de uniformidad no puede ser igual, y por consiguiente todos los coeficientes de uniformidad calculados resultan ponderados por la superficie.

La uniformidad de la distribución obtenida a partir de los datos de campo, de los volúmenes almacenados en los pluviómetros, nos sirve para determinar la lámina o altura de agua infiltrada en el área de estudio.

La uniformidad de distribución del cuarto más bajo ($UD_{25\%}$) es definida por (Keller y Bliesner, 1990) de la siguiente forma:

$$UD_{25\%} = 100 \frac{V_{25\%}}{V} = \frac{100}{V} \left(\frac{\sum L_i \cdot S_i}{\sum S_i} \right)_{25\%} (\%)$$

donde:

$V_{25\%}$ = al valor promedio ponderado de las láminas al 25% de las observaciones menores.

El coeficiente de uniformidad de Heerman y Hein (1968), es una modificación del Coeficiente de uniformidad de Christiasen, ya que, por las características de trabajo de la máquina, cada colector representa un área diferente. Por tanto su valor incide en mayor ó menor medida en la calidad de riego de la máquina.

$$CU_h = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n D_i |C_i - M_c|}{\sum_{i=1}^n C_i \cdot D_i} \right] \cdot 100 \quad (\%)$$

El coeficiente de uniformidad de Variación (CUv) de Bremond y Molle (1995), es un parámetro que incluye el coeficiente de variación dentro del CU_h. Por tanto es un indicador más sensible a la distribución de la lámina de riego.

$$CU_v = \left[1 - \frac{1}{\frac{\sum C_i D_i}{D_i}} \cdot \sqrt{\frac{\sum \left(C_i - \frac{\sum C_i D_i}{\sum D_i} \right)^2 D_i}{\sum D_i}} \right] \cdot 100 \quad (\%)$$

donde:

CU_H - es el coeficiente de uniformidad de Heerman y Hein en %.

CVv – es el coeficiente de uniformidad de variación en %.

n - es el número de colectores usados en el análisis de los datos.

Ci – Valor recogido por cada colector.

Di – Es la distancia en que se encuentra el colector del pivote o el área que este representa dentro del área total de la máquina

i - número asignado para designar un colector en particular, normalmente comienza por el colector más próximo al pivote (i = 1) y terminando con i = n para el colector más alejado del punto.

Vi o Li- el volumen (o alternatively la masa o la profundidad) del agua recogida en el colector i.

S_i - es la distancia del colector i . al punto de pivote.

M_c - es el volumen promedio medido (masa o profundidad) del agua recogida. Se calcula como:

$$M_c = \frac{\sum_{i=1}^n C_i D_i}{\sum_{i=1}^n D_i}$$

Estos conceptos y modelos matemáticos soportan el software pluviopivot al que se introduce la información relacionada con el diámetro del pluviómetro en cm y el volumen de agua en forma de lámina decepcionada o interceptada por cada recipiente. Esta información incluye también (aunque no influye en las evaluaciones) la fecha, la regulación del temporizador, el cultivo y su fase de desarrollo, velocidad y dirección del viento, dirección de la máquina, ajuste del temporizaor, fecha, etc

Para el análisis hidráulico de estas máquinas y establecer parámetros como la distribución de las boquillas, existen en el país varios programas entre los que se pueden mencionar el “**Pivot**” referido por González y Navarro (1999) y el “**Simufre**” referido por Pérez (1998), los cuales como resultado ofrecen las soluciones para mejorar la distribución del agua. El análisis hidráulico, sin embargo, debe estar siempre acompañado de una correcta evaluación pluviométrica.

El uso de coeficientes de uniformidad ponderados por superficie para máquinas de pivote central, se viene planteando desde el pasado siglo en la bibliografía internacional destacándose los trabajos de Heerman y Hein, citados por Pacheco (2004), que modificaron el conocido Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (1942) para ponderarlo por superficie. Posteriormente, Merriam y Keller (1978), Merriam et. al., (1980), citado este último por Faci y Bercero (1990) contribuyeron todos al desarrollo de los actuales conceptos de la ponderación por superficie. En

nuestro país se publica sobre la ponderación por superficie para las máquinas de pivote central en los trabajos de Pérez (1998) y Pacheco (2003).

1.3. Uniformidad de aplicación del riego con máquinas de pivote central

Muchos trabajos investigativos se han ejecutado para determinar la eficiencia técnica y el coeficiente de uniformidad del pivote, que debe ser elevado para garantizar alta eficiencia en el riego.

Según Montero et al., (1999), el primer factor que influye en la uniformidad de los pivotes es el correcto diseño y el adecuado mantenimiento de la carta de emisores, sin encontrar diferencias significativas respecto al tamaño del equipo, la velocidad del viento, la presión de funcionamiento de los emisores o la utilización de difusores o de aspersores de impacto.

Es de destacar que Heineman y Frizone (1995) y Tarjuelo (1999, 2005), coinciden en la importancia de lograr elevados coeficientes de uniformidad, pues se produce el mismo efecto en la producción. Plantean uniformidades entre 82 y 88% para cultivos extensivos, y profundidad radical media, para frutales y forrajes entre 70 y 80%.

En Cuba se hace necesario seguir estudiando la uniformidad porque las validaciones obtenidas por Alemán (1996, 2001), han tenido variaciones con la introducción de nuevas máquinas y más modernos emisores, adaptados a las cambiantes condiciones de los vientos y el clima.

Para evaluar la uniformidad de los sistemas de pivote central se hace midiendo la pluviometría de la máquina, es decir, midiendo la cantidad de agua que es interceptada por unos depósitos colocados de manera uniforme sobre la superficie del suelo, con el objetivo de que el agua que debía llegar al suelo sea recolectada por estos recipientes, la que será medida y permitirá evaluar la uniformidad del riego. La ubicación de los pluviómetros se hace siguiendo una línea recta y equidistantes entre si. Es necesario tener en cuenta la importancia de la muestra

que se recoge en los pluviómetros, a medida que se acercan al extremo de la máquina no tienen el mismo peso dentro de la muestra en la pluviometría.

Otros parámetros que miden la calidad del riego y su uniformidad son

- ❖ La Altura media recogida (AMR),
- ❖ Área regada adecuadamente (ARA),
- ❖ Área regada excesivamente (ARE) y
- ❖ El Área regada insuficientemente (ARI), utilizados por (Montero et al/ 1999)

La AMR = Volumen medio recogido por el set de pluviómetros. Que se pondera por el factor superficie

Definido ese parámetro se determinan los otros que caracterizan la uniformidad de la aplicación del riego en función de las relaciones matemáticas siguientes

$$0.85(AMR) \leq ARA \leq 1.15(AMR)$$

$$1.15(AMR) < ARE$$

$$0.85(AMR) < ARI$$

$$\text{Por tanto } ARE + ARA + ARI = 100\%$$

Se considera como Área regada adecuadamente (ARA) aquella que se encuentra entre el 85 % y el 115 % del la lámina media ponderada.

El área que recibe una lámina de agua por debajo del 85 % se considera como área regada insuficientemente (ARI), infrairrigada o subirrigada, mientras que la que recibe un volumen superior en un 15 % ó más de la lámina media se considera regada excesivamente (ARE) o sobreirrigada

En el cálculo de ARA, ARE y el ARI se parte del criterio que una lectura es representativa de un área en forma de anillo, delimitada por sus dos lecturas vecinas, y que esta área aumenta en la medida que su distancia al pivote es mayor.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización y caracterización del suelo, el clima y el cultivo

El presente trabajo se desarrolló en la UBPC Cuba Libre de la Empresa Agropecuaria Horquita, donde según el estudio de Suelos a escala 1: 10 000 por la II Clasificación Genética de Suelos de la Academia de Ciencias de Cuba, se encontró la existencia de 2 Subtipos de Suelo, representados en 3 contornos como puede ser observado en el mapa de Suelos adjunto a este informe, su descripción aparece en la siguiente tabla.

Tabla 2 Clasificación de los suelos de las máquina 3, 11 y 22

# <i>Contorno</i>	SUBTIPOS DE SUELO	Má- quina	Cuadrante	DESCRIPCION
1	II A 6 ₃ p ¹ h ⁴ / b 208 t ₂	3 22	I, II, III, IV I Otras áreas	Ferralítico Rojo; Típico; Caliza Dura, Saturado; Muy Profundo, Poco Humificado; Arcilla Caolinítica; Profundidad Efectiva 208 cm; Topografía Llana.
2	II A 6 ₃ p ¹ h ³ / b 145 t ₃	22 11	II I, II, III, IV Otras áreas	Ferralítico Rojo; Típico; Caliza Dura, Saturado; Muy Profundo, Medianamente Humificado; Arcilla Caolinítica; Profundidad Efectiva 145 cm; Topografía Casi Llana.
3	II D 6 ₃ p ¹ h ² / b 35 t ₂	22	I Otras áreas	Ferralítico Rojo; Hidratado; Caliza Dura, Saturado; Muy Profundo, Medianamente Humificado; Arcilla Caolinítica; Profundidad Efectiva 35 cm; Topografía Llana.

En el I subtipo que abarca casi toda el área, excepto el cuadrante I de la máquina 22, el drenaje superficial e interno es bueno, la Profundidad Efectiva tiene comportamiento variable de un contorno a otro (208 y 145 cm. respectivamente), en dependencia de la aparición del material originario, se evalúa como Muy Profunda y Profunda, ello propicia que se adapten a estas condiciones la generalidad de los cultivos de interés agrícola. La velocidad de infiltración: 40 mm/h, la Capacidad de Campo: 35 % pss y la densidad aparente de 1.3 g/cm³.

En el II subtipo, que son los suelos ferralíticos rojos hidratados, el drenaje Superficial es considerado como Bueno, mientras que el Interno se evalúa de moderado a deficiente por la presencia de formas hidratadas del hierro por las condiciones de hidromorfía temporal, reflejadas por la presencia de manchas amarillentas en el Solum, ello influye en que la profundidad efectiva alcance solamente 35 cm., se evalúa como poco profunda, constituyendo una limitante en su uso agrícola para cultivos que requieren mayor profundidad. La velocidad de infiltración es de 24 mm/h, la capacidad de campo es del 30 % pss y el peso volumétrico o densidad aparente de 1.8 g/cm³.

El trabajo se realizó en la campaña de papa (*Solanum Tuberosum*, L) comprendida entre los meses de noviembre del 2011 y febrero del 2012. Las variedades plantadas son

El comportamiento de las variables climáticas de temperatura, humedad relativa, precipitaciones, velocidad del viento y evaporación se resumen en la siguiente tabla. De estas variables se destaca la temperatura cuyo valor medio en el periodo de estudio estuvo siempre por encima de la media histórica, lo que implica que otros elementos climáticos relacionados directamente con la temperatura sean superiores a otros años como ocurre con la evaporación. En ese lapso de tiempo las lluvias fueron escasas al presentarse solo en febrero con 38 mm, en los otros tres meses no llovió o no se le consideró significativa al estar por debajo de los 4 mm, esto explica aún más la necesidad de recurrir al riego para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos.

Tabla 3: Comportamiento medio mensual de las variables climáticas

Variables	noviembre	diciembre	enero	febrero
Temperatura Máxima °C	28,9	27,7	27,7	29,7
Temperatura Mínima °C	18,05	17,14	15,5	17,5
Temperatura media °C	23,48	22,4	21,6	23,7
Temperatura media histórica °C	23,01	22,05	21,04	23,02
Humedad Relativa %	75.8	75.12	68.8	68.7
Humedad Relativa media histórica %	80,87	80,45	74,45	74,21
Lluvias mm	5	1.5	0	38
Evaporación promedio diaria mm.día ⁻¹	5,11	4,96	5,33	5,83
Velocidad del viento m.s-1	4,31	5,8	5,09	5,7

2.2. Caracterización de las máquinas western 3, 11 y Urapivot 22.

Se hace una caracterización de cada una de las máquinas objeto de este trabajo dos de ellas de la marca Western y una Urapivot de diferentes características técnicas, utilizándose para ello el catálogo de cada máquina, la observación directa del proceso de riego y la entrevista a operadores y directivos.

La interpretación de la carta de riego es el punto de partida para planificar una adecuada explotación de la máquina de riego y su vez una vía para comprobar la efectividad tanto del diseño hecho por el fabricante como del riego que se está aplicando.

La caracterización incluye todos los parámetros técnicos relacionados con el radio de alcance, altura, velocidad de giro, lámina de agua a entregar por cada regulación, presión de trabajo para un buen funcionamiento, hidromódulo o gasto específico.

2.3. Evaluación de la pluviometría de las máquinas

Se evaluaron las máquinas de pivote central Western 3 y 11 y la Urapivot 22, durante el periodo de riego del cultivo de la papa (*Solanum Tuberosum*, L). Las máquinas 3, 11, y 22 son de 8, 9 y 7 torres respectivamente.

Se determinaron los parámetros de trabajo siguientes:

- Lámina de aplicación
- Velocidad y presión de trabajo de la máquina
- Lámina media ponderada
- Lámina media ponderada para l 25 % menos regado
- Coeficiente uniformidad ponderada
- Coeficiente de variación ponderado
- Uniformidad de la distribución ponderada

Se realizaron dos evaluaciones a cada una de las máquinas objeto de estudio en este trabajo, con diferentes láminas netas de riego, que requieren por tanto diferentes velocidades de desplazamiento.

Para ubicar los pluviómetros se trazó una línea visual en cada máquina la cual guiaría la ubicación de los pluviómetros, en ambas mediciones se tomó la misma dirección

Se utilizaron recipientes plásticos de 400 ml de capacidad y 10,4 cm de diámetro, los que se colocaron en línea recta a la distancia señalada anteriormente.

Una vez que la máquina pasó por encima de la línea de pluviómetros se pasó a registrar la información del volumen de agua interceptado o recogido por cada pluviómetro, para esta operación se emplea una probeta graduada de 1 000 ml. Al realizar cada medición se anotan los resultados en un registro habilitado al efecto, el cual incluyó la fecha de la medición, la hora, la máquina, dirección de los pluviómetros y la máquina, regulación de la máquina, lámina a entregar.

Con la información obtenida se procedió al procesamiento con ayuda

2.4 La eficiencia de la aplicación

La eficiencia de la aplicación expresa la relación entre la lámina de agua entregada por la máquina de acuerdo a la regulación establecida y la lámina interceptada o medida en los pluviómetros. La diferencia entre ambos valores corresponde a las pérdidas por evaporación y desviación por el viento durante el proceso del riego, debido fundamentalmente al efecto de las condiciones

climáticas (temperatura, humedad, viento, etc.), además de los errores propios de la metodología (Tarjuelo, 1999).

Con los valores de la altura media recogida en los pluviómetros (AMR), se puede determinar

- ❖ El área regada adecuadamente (ARA),
- ❖ El área regada excesivamente (ARE) que será aquella en la que los pluviómetros registraron volúmenes de agua superiores en un 15 % a la altura media recogida.
- ❖ El área regada insuficientemente (ARI), que será aquella en la que los pluviómetros registraron volúmenes de agua inferiores en un 15 % a la altura media recogida.

Máquina	Tramos de la máquina												Voladizo
			U/M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
3	Longitud		m	55.4	54.9	54.9	54.9	54.9	49.1	49.1	49.1		16.7
	Boquillas	#	u	27	29	29	29	29	26	26	26		8
		Tipo	PC-DS primera boquilla del tramo 2 al voladizo y última de los tramos del 1 al 8 D3000B, el resto de las boquillas										
		Presión	Bar	3	2.7	2.5	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9		1.9
	Caudal promedio		m ³ /h	5.6	13.2	22	30.6	39.6	42.7	49.8	56.8		22.7
	Área		ha	1	2.9	4.7	6.6	8.5	9.2	10.8	12.3		4.5
11	Longitud		m	55.4	54.9	54.9	54.9	54.9	54.9	49.1	49.1	49.1	16.7
	Boquillas	#	u	27	29	29	29	29	29	26	26	26	8
		Tipo	PC-DS primera boquilla del tramo 2 al voladizo y última de los tramos del 1 al 8. D3000B, el resto de las boquillas										
		Presión	Bar	4	3.5	3.0	2.7	2.3	2.1	2.0	1.9	1.9	1.9
	Caudal promedio		m ³ /h	6,2	12,8	21,3	29,9	38,8	49,1	50,4	57,2	67,5	25,8
	Área		ha	0.96	2.86	4.75	6.64	8.53	10.43	10.93	12.44	13.96	5.09
22	Longitud		m	62	61.2	61.2	54.5	54.5	54.5	54.5			13.4
	Boquillas	#	u	26	27	27	24	24	24	24			6
		Tipo	PC-DS primera boquilla del tramo 2 al voladizo y última de los tramos del 1 al 7 D3000B, el resto de las boquillas										
		Presión	Bar	3.3	2.9	2.7	2.5	2.3	2.3	2.3			2.3
	Caudal promedio		m ³ /h	6.53	16.54	27.46	33.68	42.27	50.88	59.43			17.29
	Área		ha	1.2	3.5	5.9	7.2	9.11	10.9	12.84			3.44

Tabla 4 características generales de las máquinas Western 3 y 11 y la Urapivot 22.

3. RESULTADO Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de las máquinas de riego Western 3 y 11 y Urapivot 22.

A partir del catálogo de las máquinas de riego se hizo la caracterización de las mismas

Tabla 5: Características técnicas de las máquinas de riego 3, 11 y 22

Parámetros	u/m	Máquinas		
		Western 3	Western 11	Urapivot 22
Presión de trabajo en el pivot	Kgf.cm ⁻²	3.46	4.58	4.07
Gasto teórico	L.s ⁻¹	80	99.7	75
Radio de riego	m	439	495	415
Área Bruta de riego	ha	60.54	77	54.5
Velocidad de la máquina	m.min ⁻¹	5.06	5.06	3.44
Coordenadas	X	522 832	522 405	522 439
	Y	262 833	261 433	261 982
Hidrmódulo	L.s ⁻¹ ha ⁻¹	1.3	1.3	1.4
# de torres	U	8	9	7
Longitud del Voladizo	m	14	17	13
Altura de la Máquina	m	3.6	3.6	2.4
Potencia del motor	Kw	86	102	75
Boquillas	U	229	258	182
Altura de las boquillas	m			

A partir de estos parámetros técnicos se pueden establecer las diferencias entre estas tres máquinas tales como: el área bruta de riego que está determinada por su longitud total, la distribución de las boquillas y su relación con el gasto o caudal, con la intensidad de la aplicación, la presión de trabajo y la lámina de riego.

En la medida que aumenta la longitud de la máquina debe aumentar también la presión de trabajo requerida en el pivote de la máquina, la que guarda estrecha relación con calidad y la uniformidad del riego. La velocidad de giro de la máquina es un elemento de vital importancia que decide si esta puede o no emplearse para

el riego de un cultivo en determinadas condiciones de suelo y clima; de esta velocidad se deduce si el sistema es capaz de garantizar con los volúmenes de agua requeridos por el cultivo o grupo de cultivos, los intervalos de riego, siempre teniendo presente que el sistema no podrá funcionar de manera permanente al requerir de un tiempo para dar mantenimientos y hacer reparaciones, es decir que cumpla la condición de que el tiempo de riego (el tiempo que necesita para cubrir con un riego toda el área) sea menor que el intervalo de riego.

El hidromódulo de estas máquinas es relativamente alto y pudiera ser una limitante si no se posee una fuente de abasto potente con una capacidad de almacenamiento y de recuperación alta, afortunadamente la fuente empleada para estas tres máquinas es el manto freático de una cuenca subterránea que a pesar de los años de intensa explotación no ha reducido su capacidad, no obstante es un elemento que se debe considerar pues esta cuenca no es inagotable y con el tiempo pueden aparecer los problemas de empobrecimiento y de salinización que hay que tratar de evitar desde ahora.

Las tres máquinas objeto de este trabajo están dotas de un voladizo final que si bien consigue un aumento del alcance o radio de riego y por consiguiente del área total de riego debe prestársele atención a su correcto funcionamiento teniendo en cuenta que es un aspersor de impacto que lanza el agua con un ángulo de inclinación todo lo cual favorece la influencia negativa más marcada del viento.

Estos parámetros técnicos fueron comprobados en cada máquina verificándose cada uno lo que permitió concluir que tanto en el montaje como en la posterior explotación de estos tres sistemas de riego se ha sido muy cuidadoso y exigente demostrado en el cabal cumplimiento de las normas de instalación.

La carta de riego de cada máquina

En el diseño de la máquina de riego uno de los elementos que se precisa por el fabricante es la velocidad de giro que está determinada o establecida por la velocidad de la última torre. A partir de esta información se diseña el informe de porcentaje cronométrico, el que aparece en forma de tabla y establece para una amplia gama de % de giro en base a la máxima velocidad que se correspondería con el 100 % de posibilidad de recorrer la circunferencia en el menor tiempo

posible y entregando la menor lámina de agua. En la medida que el % de giro disminuye el riego se hace más lento y como no varía ni el caudal ni la intensidad entonces se consigue la entrega de mayor lámina de agua o norma de riego.

Este informe cronométrico debe ser revisado y comprobado en la máquina de manera frecuente para evaluar su efectividad, así como su cumplimiento en función de las variables climáticas.

%	Western 3			Western 11			Urapivot 22		
	mn	Velocidad	Tiempo giro	mn	Velocidad	Tiempo giro	mn	Velocidad	Tiempo giro
	mm	m.min ⁻¹	h	mm	m.min ⁻¹	h	mm	m.min ⁻¹	h
100	4.06	5.06	8.73	4.59	5.06	9.87	5.71	3.44	12.25
90	4.51	4.56	9.70	5.10	4.56	10.97	6.34	3.10	13.61
80	5.07	4.05	10.92	5.73	4.05	12.34	7.13	2.75	15.31
70	5.80	3.54	12.48	6.55	3.54	14.10	8.15	2.41	17.49
65	6.24	3.29	13.44	7.06	3.29	15.18	8.78	2.24	18.84
60	6.76	3.04	14.56	7.64	3.04	16.45	9.51	2.06	20.41
55	7.38	2.78	15.88	8.34	2.78	17.94	10.37	1.89	22.27
50	8.12	2.53	17.47	9.17	2.53	19.74	11.41	1.72	24.49
45	9.02	2.28	19.41	10.19	2.28	21.93	12.68	1.55	27.21
40	10.15	2.03	21.83	11.47	2.03	24.67	14.26	1.38	30.61
35	11.59	1.77	24.95	13.10	1.77	28.20	16.30	1.20	34.99
30	13.53	1.52	29.11	15.29	1.52	32.90	19.02	1.03	40.82
25	16.23	1.27	34.94	18.35	1.27	39.47	22.82	0.86	48.98
20	20.29	1.01	43.67	22.93	1.01	49.34	28.53	0.69	61.23
15	27.05	0.76	58.23	30.58	0.76	65.79	38.04	0.52	81.64
12	33.82	0.61	72.78	38.22	0.61	82.24	47.55	0.41	102.05
9	45.09	0.46	97.04	50.96	0.46	109.65	63.40	0.31	136.06
6	67.63	0.30	145.56	76.44	0.30	164.48	95.10	0.21	204.10
3	135.27	0.15	291.13	152.88	0.15	328.96	190.19	0.10	408.19

Tabla 6 Aplicación del agua de las máquinas, profundidad por revolución

De las tres máquinas estudiadas la Western 3 es la que puede entregar una menor lámina moviéndose al 100 % de velocidad posible lo que le da mayor posibilidad de utilización en cultivos menos exigentes a normas altas de riego, además permite aplicar riegos con normas reducidas cuando correspondía la aplicación del riego con ocurrencia de una lluvia previa que no completó las necesidades del cultivo. Esta máquina tiene también las menores diferencias entre las láminas de agua entre una regulación y otra lo que hace más posible que coincida la lámina deseada con la cronometrada en el regulador.

Las dos máquinas Western se desplazan a la misma velocidad para igual regulación del temporizador, sin embargo la 11 que posee mayor longitud, radio de alcance y por tanto abastece mayor área posee una pluviometría mayor, en tanto la Urapivot que es la de menor radio, menor alcance y menor área bruta de las tres desarrolla una menor velocidad para igual regulación del cronómetro entregando mayor lámina de agua.

Del análisis de la regulación de la velocidad de la máquina por lámina o norma a entregar se llegó a obtener la expresión que permite determinar las regulaciones no establecidas por el fabricante para otras normas de riego que tampoco están en la programación

Western 3	Western 11	Urapivot 22
$y = \frac{406}{x}$	$y = \frac{459}{x}$	$y = \frac{571}{x}$

En las observaciones realizadas directamente en cada máquina se pudo constatar que existe total correspondencia entre las características técnicas reflejadas en el catálogo de cada una y la realidad del diseño y explotación

3.3. Evaluación de la pluviometría de las máquinas

Las evaluaciones fueron realizadas en las dos etapas iniciales del cultivo: Plantación emergencia y en la de crecimiento teniendo en cuenta que el objetivo es evaluar la máquina y que en estas etapas el desarrollo del área foliar del cultivo permite realizar las mediciones sin contratiempos.

Al realizar la evaluación pluviométrica se tomaron otros datos de interés para el trabajo como son la regulación de la máquina, la lámina a entregar, la regulación del temporizador en correspondencia con la norma de riego, la presión de trabajo. Los datos obtenidos en la evaluación pluviométrica fueron procesado con el software pluviopivot que es un método elaborado precisamente para evaluar máquinas de pivote central.

Las evaluaciones realizadas a la máquina Western 3 arrojaron los resultados siguientes:

La primera evaluación se efectuó el 12 de enero cuando correspondía aplicar un riego de $135,3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ el día se comportó como correspondía para la etapa del año, fresco con temperatura en la mañana que no rebasaba los 23°C , viento en calma con $1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ y humedad relativa del 78 %.

El sistema debía entregar una lámina de 13.53 mm. Sin embargo una vez medida la lluvia producida por la máquina y ponderado sus resultados se obtuvo que la lámina de agua media ponderada fuera de 12,79 mm, con un coeficiente de variación ponderado del 24,1 %. La diferencia entre la lámina de agua teórica y la lámina media ponderada difieren de manera significativa como lo ilustra el coeficiente de uniformidad ponderado que es de 82,1 % estando por debajo del 85 %, límite, que según Tarjuelo, 2005, se debe alcanzar para que un área se considere bien regada. Para el 25 % de los pluviómetros que menos agua recolectaron la media ponderada fue de 9,19 que está aún más alejada de la lámina que se debía entregar.

La representación gráfica de la lámina media ponderada y la altura del agua recogida en los pluviómetros puede verse en el siguiente gráfico el que refleja además que no existen área con gran desbalance respecto al resto en relación con la lámina de agua recogida

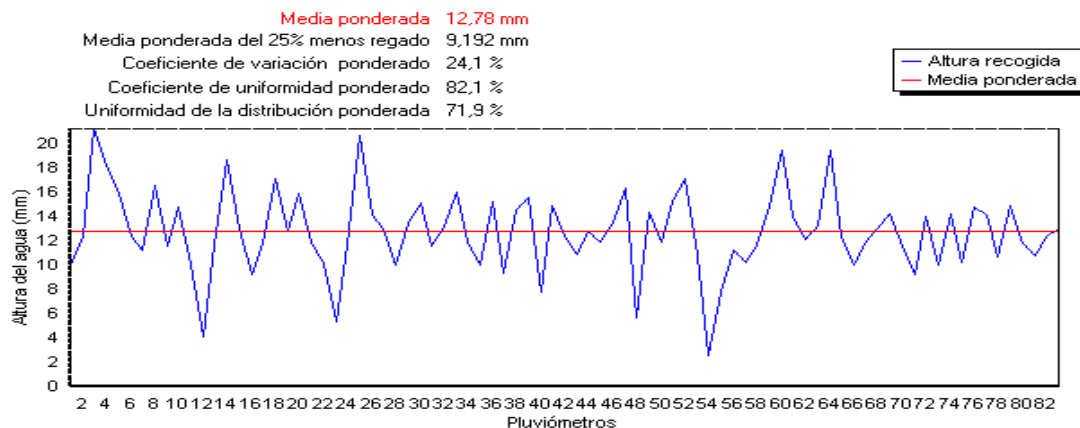


Figura 2; Primera evaluación pluviométrica a la máquina 3.

Para la segunda evaluación se tomó una fecha que correspondiera con la segunda etapa, escogiendo como día el 20 de febrero, en el que se tenía planificado un riego de 20,29 mm para lo cual la máquina trabajaría con una regulación del 20 %. La temperatura promedio del día estaba en 24.4 °C y la humedad relativa al 75.5 %. En esta ocasión se superaron los resultados anteriores aún cuando la lámina media ponderada no logra ser igual a la lámina requerida, pero si se logra un coeficiente de uniformidad del 87,4 % para colocarse en el rango de 85 – 90 % que según Tarjuelo (2005), es el de un área bien regada.

En esta segunda evaluación se observó también una disminución de la diferencia entre la media ponderada para toda el área y la media para el 25 del área menos regada, siendo esta última de 15,132. Todo esto nos indica que en esta ocasión se garantizó un mejo riego.

La representación gráfica de la altura del agua recogida por pluviómetro y le media ponderada se ilustra en el siguiente gráfico.

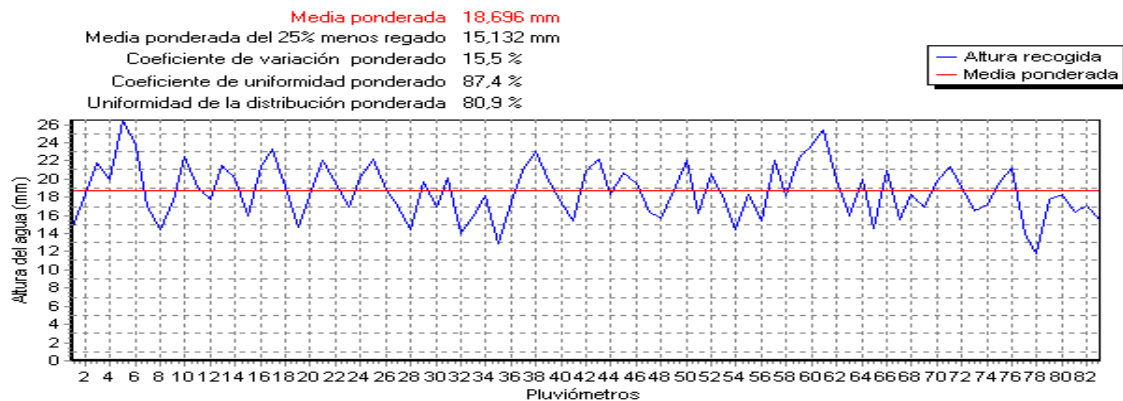


Figura 3; segunda evaluación pluviométrica a la máquina 3.

Para la máquina Western 11 la primera evaluación se realizó el 22 de enero en un día fresco con temperatura media de 22.9 °C, humedad relativa del 58 % y vientos del este a 4,1 m.s⁻¹, elemento este último que fue el que más influyó en la pérdidas de agua y en la uniformidad del riego.

Una vez realizadas la mediciones y procesados los datos se pudo constatar que la lámina de agua interceptada está cerca de la lámina de riego teórica pues de 27.05 mm se registraron como media ponderada 24.816 y el coeficiente de uniformidad obtenido se considera bueno al alcanzar 86.9 %. No existe una gran diferencia entre lo valores obtenidos para la media ponderada de la aplicación y los valores obtenidos para el 25 % del área menos regada, como se ilustra en la siguiente figura.

También se puede observar que en general hay pocos pluviómetros con registros muy bajos que afecten de manera considerable el valor medio y los que en este caso están se encuentran rodeados de pluviómetros con valores superiores lo que facilita que los problemas de uniformidad que existan se corrijan con el movimiento del agua por diferencia de tensión dentro del suelo.

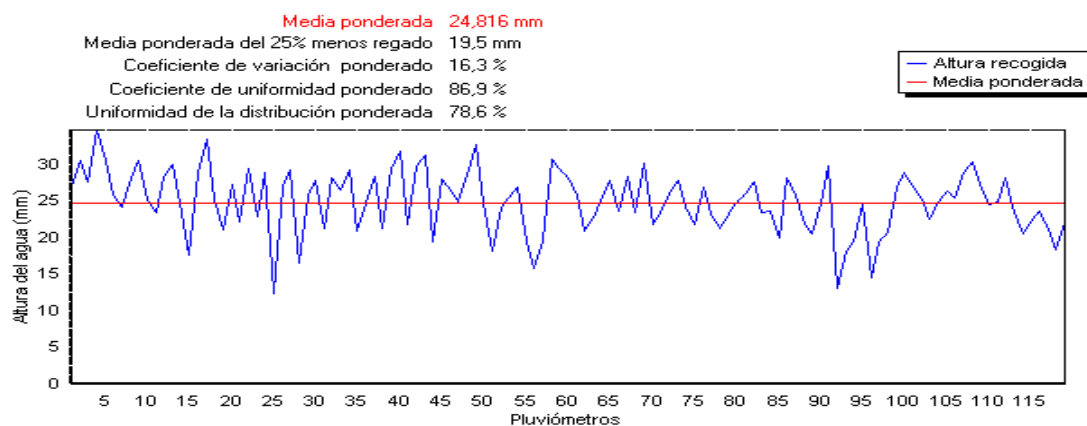


Figura 4; Primera evaluación pluviométrica a la máquina 11

Para la segunda evaluación se tomó el día 23 de febrero en el cual la máquina estaría moviéndose al 30 % para entregar una lámina de agua de 23, 93 mm. El día fresco con temperaturas de 24,75 °C, vientos ligeros de 3,2 m.s⁻¹, humedad relativa de 75,5%.

La altura de la lámina ponderada de agua recogida por los pluviómetros tampoco es igual a la lámina teórica a entregar, quedándose 3 mm por debajo, pero con un coeficiente de de uniformidad de 87,7 % que permite evaluar al área como bien regada, según Tarjuelo (2005). En la representación gráfica se puede observar como la influencia del viento condujo a una distribución irregular, principalmente desde la mitad de la máquina hacia el final, a pesar de que la velocidad fue relativamente baja.

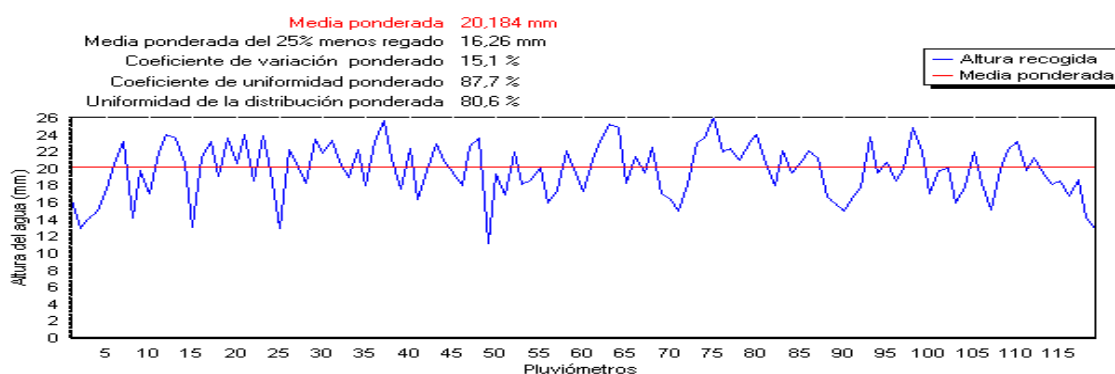


Figura 5; Segunda evaluación pluviométrica a la máquina 11

La máquina Urapivot identificada con el número 22 también fue objeto de dos evaluaciones pluviométricas.

La primera evaluación se realizó el 10 de enero con condiciones climáticas favorables en casi todas las variables que inciden en la calidad del riego como la temperatura que tuvo un valor de 23,05 °C y la humedad relativa de 71,5 %, no así el viento que tuvo un comportamiento agresivo para la uniformidad y calidad del riego, no solo por su velocidad de $4,8 \text{ m.s}^{-1}$ ($17,28 \text{ km.h}^{-1}$), si no por los cambios de dirección en forma de remolino, es por ello que la distribución de la pluviometría de la máquina muestra una irregularidad durante todo su trayecto y hace que el coeficiente de uniformidad esté por debajo del 85 %, límite mínimo considerado para calificar al área como bien regada, aunque estuvo bastante cerca con 84,8 %.

La lámina de agua interceptada por los pluviómetros una vez que fue ponderada por el factor superficie nos muestra que la irregularidad en la uniformidad impidió que al suelo llegara la lámina necesaria y que haya una diferencia de 4,4 mm entre la media ponderada y la media ponderada del 25 % menos regada lo que implicó que la uniformidad de la distribución ponderada sea de solo un 77,4 %

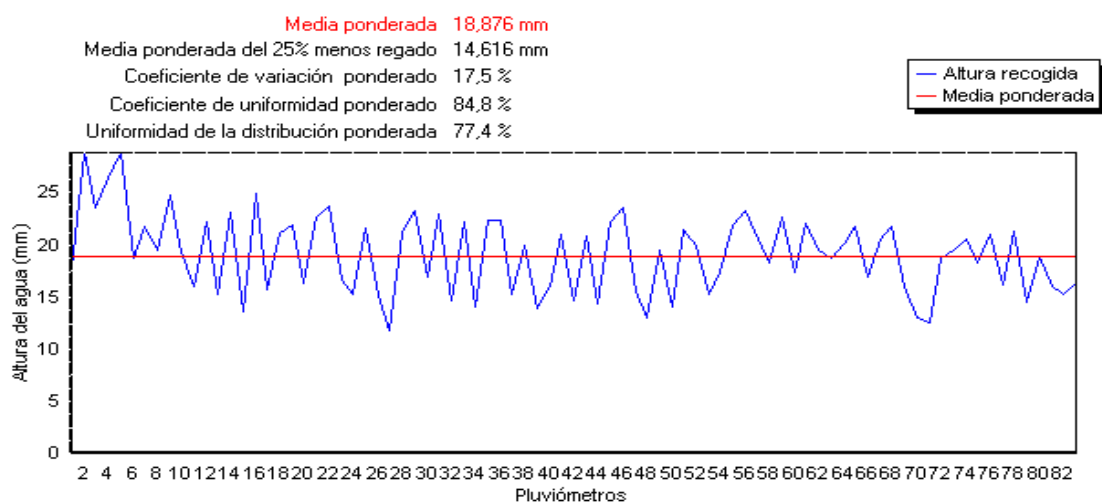


Figura 6; Primera evaluación pluviométrica a la máquina 22

La segunda evaluación se realizó el 22 de febrero con condiciones favorables para el riego, la temperatura fue de 24,2 °C, la humedad relativa del 64 % y la velocidad del viento $0,2 \text{ m.s}^{-1}$, ninguno de ellos tuvo una marcada influencia negativa en la

uniformidad y calidad del riego como lo demuestran los resultados obtenidos al procesar los valores de los volúmenes de agua recogidos por los pluviómetros.

La regulación de la máquina fue del 20 % para entregar una lámina o norma de riego de 28,53 mm. Una vez realizada la medición y procesada la información se pudo comprobar que se había realizado un riego de buena calidad al obtener un coeficiente de uniformidad ponderado del 88,4 % y una lámina media ponderada de 26,904 mm que representa que sólo 1,626 mm de los 28,53 aplicados no llega al suelo. Estos datos permiten evaluar al área como bien regada al encontrarse por encima del 85 % el coeficiente de uniformidad ponderado.

La uniformidad de la distribución ponderada alcanzó un 80,6 % que también se considera bueno y no es mayor por que en el 25 % d menor pluviometría o menos regado se incluyen tres pluviómetros que presentaron alguna interferencia, por lo que captaron volúmenes muy bajos como puede apreciarse en la siguiente figura

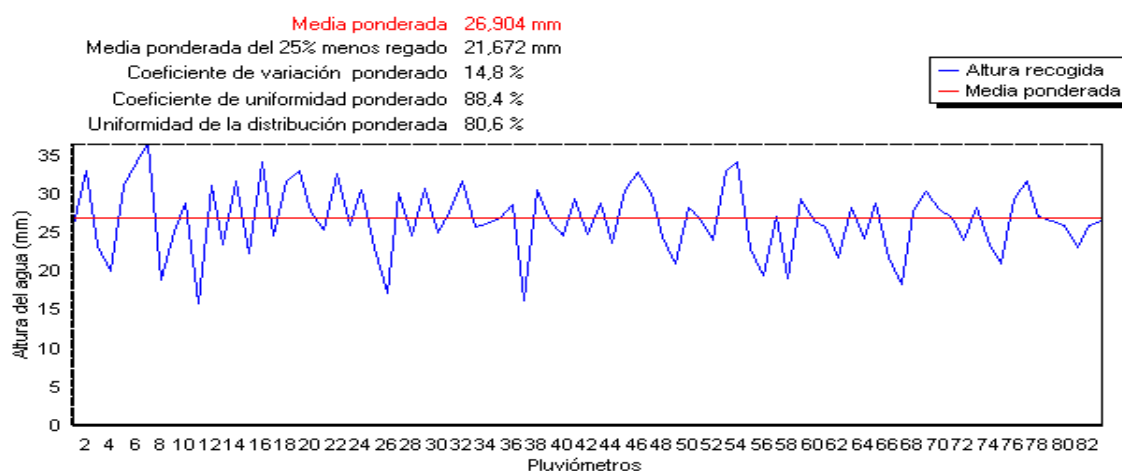


Figura 7; Segunda evaluación pluviométrica a la máquina 22

Una vez concluidas las mediciones y procesados los datos se pudo comprobar que en general se consiguen coeficientes de uniformidad superiores al 85 % con excepción de la primera medición en la Western # 3, las láminas medias ponderadas están siempre por debajo de la láminas que debían entregarse según las regulaciones correspondientes. La uniformidad de la distribución para el 25 %

del área menos regada mostró valores satisfactorios con excepción de la primera medición en la Western 3 en la que se logró 71,9 %.

Parámetros	UM	Western				Urapivot	
		3		11		22	
		1	2	1	2	1	2
Regulación de la máquina	%	30	20	20	30	30	20
Lámina media ponderada	mm	12.79	18.696	24.82	20.18	18.88	26.90
Lámina según el fabricante	mm	13.53	20.9	27.05	23.93	19.2	28.53
Lámina ponderada del 25 % de menor pluviometría.	mm	9.19	15.13	19.5	16.26	14.62	21.67
Coefficiente de uniformidad (CUh)	%	82.1	87.4	86.9	87.7	84.8	88.4
Coefficiente de Variación (CUV)	%	24.1	15.5	16.3	15.1	17.5	14.8
Uniformidad de la distribución (UD 25 %)	%	71.9	80.9	78.6	80.6	77.4	80.6
Velocidad el viento	m.s ⁻¹	1.8	2.1	4.1	3.2	4.8	0,2
Velocidad de avance	m.h ⁻¹	1.52	1.01	1.01	1.52	1.03	0.69

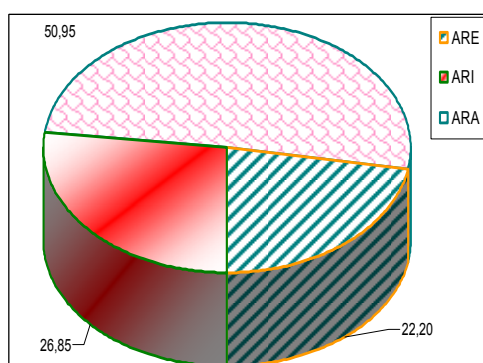
Tabla 7 Resultados de las dos evaluaciones realizados a cada máquina

3.3 Uniformidad de la aplicación

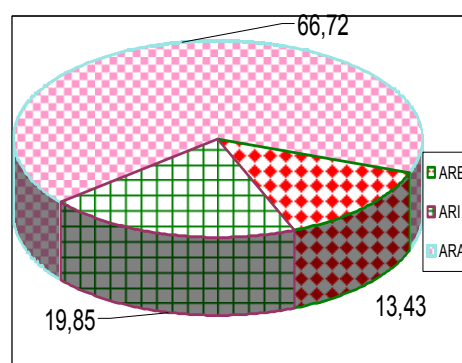
La determinación de la uniformidad de la aplicación del riego en cada una de las evaluaciones realizadas a las tres máquinas permitió conocer el comportamiento real del riego y su calidad a través de dividir el área en tres categorías: Área regada excesivamente (ARE), que representa aquella área donde el pluviómetro que la representa capturó un volumen superior en un 15 % a la altura media recolectada, área regada insuficientemente o subirrigada (ARI) que se refiere al área donde los pluviómetros reportan valores por debajo del 85 % de la lámina media de la máquina. Entre estos dos límites se encuentra el Área regada adecuadamente (ARA)

En las dos mediciones a la Máquina Western # 3 se observó un aumento considerable del área regada adecuadamente (ARA) de la segunda medición

respecto a la primera, coincidiendo con los resultados del coeficiente de uniformidad de la evaluación pluviométrica. El funcionamiento de la máquina a una velocidad inferior es uno de los factores que influyó para que la segunda medición el riego tuviera una mejor calidad, no solo por el aumento del ARA, si no por que tanto el ARE como el ARI tuvieron una disminución considerable, como puede observarse en la figura



Primera evaluación



Segunda evaluación

Fig: 8: Distribución de las áreas regadas en las dos evaluaciones de la máquina Western # 3

En las evaluaciones realizadas, la máquina Western # 11 mostró los resultados más altos y con menor diferencia entre las dos evaluaciones. El ARA fue en ambos casos superior al 60 %. Si por un lado hubo un aumento de la velocidad de traslación o de trabajo de la máquina que en el caso anterior influyó negativamente en la uniformidad y eficiencia del riego, aquí no es posible determinarlo pues otro factor que incide en estos parámetros, como la velocidad de viento, tuvo un ligero descenso de $0,9 \text{ m.s}^{-1}$, por lo que es posible que haya una cierta compensación entre estos dos elementos

En cuanto al ARE se observó un sensible aumento mientras el ARI descendió de la primera a la segunda evaluación

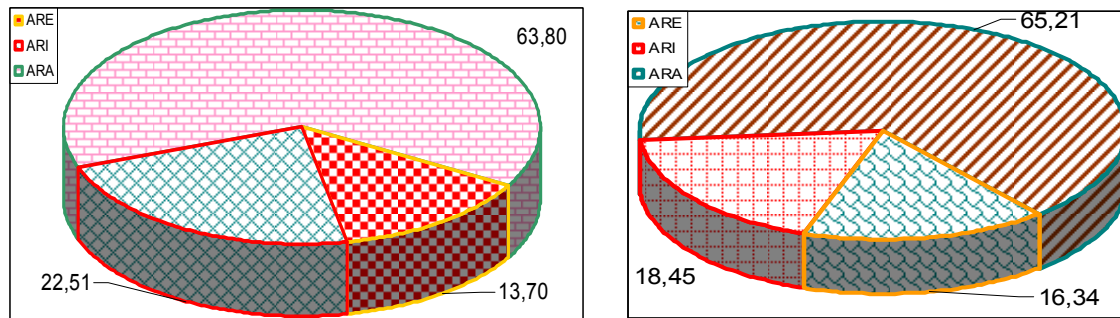


Fig 9 Distribución de las áreas regadas en las dos evaluaciones de la máquina Western # 11

Las evaluaciones realizadas a la máquina Urapivot # 22 mostró el ARA más baja de todas las evaluaciones incluso por debajo del 50 %, con la influencia del viento que estuvo en $4,8 \text{ m.s}^{-1}$, lo que demuestra que es este el elemento principal a tener en cuenta para definir el momento de regar. Esta evaluación se realizó con una regulación de la máquina del 30 %. En la segunda evaluación con una regulación del 20 % y una velocidad del viento de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$, se pudo obtener la mayor ARA de todas las evaluaciones con 69,94 %. Fueron también los resultados de ARE y ARI los más bajo de todas las evaluaciones, por lo que esta la que mostró el riego de mayor calidad y uniformidad. Esto coincide también con los resultados de la evaluación pluviométrica donde esta misma evaluación arrojó el mayor coeficiente de uniformidad y el menor coeficiente de variación.

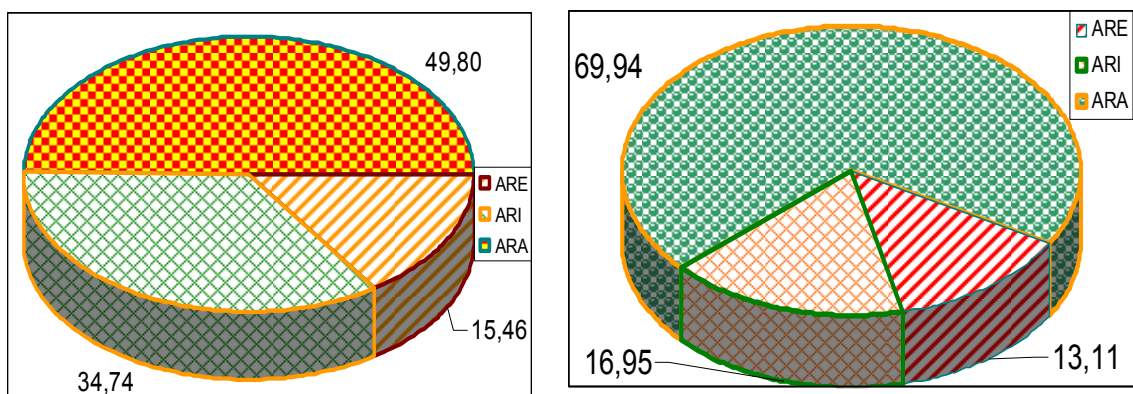


Figura 10. Distribución de las áreas regadas en las dos evaluaciones de la máquina Urapivot

Después de realizadas las dos evaluaciones a cada máquina se pudo inferir que fue la máquina Western 11 la de mejores resultados, mientras la segunda evaluación de la Urapivot 22 fue la que mostró los mejores resultados de todas las evaluaciones y en general se consideran los resultados como buenos los que superan los obtenidos por Jiménez (2010), en cuya evaluación el ARA nunca superó el 60 %. Estos resultados también coinciden con la evaluación pluviométrica y ratifican no solo que las mejores regulaciones de las evaluadas por máquinas para este cultivo son el 20 % para la Western # 3 y Urapivot # 22, así como el 30 % para la Western # 11 con los que se logra el mayor por ciento del área regada adecuadamente (ARA) con 66,67, 65,21 y 69,94 % respectivamente y es la Western # 11 la de mejores resultados de las tres evaluados.

Estos resultados deberán ser tenidos en cuenta a la hora de definir el régimen de riego del cultivo en cada máquina teniendo en cuenta las condiciones locales y las exigencias del cultivo, se puede establecer una regulación fija como las estudiadas y variar el intervalo de riego.

Conclusiones:

- ❖ Situar las máquinas en los parámetros reales de explotación permitió ajustar sus regímenes de trabajo y explotación para conseguir un uso más eficiente.
- ❖ Las máquinas de riego Western 3 y 11 y la máquina Urapivot 22 de la Empresa Agropecuaria Horquita cumplen con las normas del fabricante.
- ❖ La máquina Western 3 y Urapivot 22 efectúan el riego con mayor uniformidad al 20 % con 87.4 y 87.7 % respectivamente, mientras que para la Western 11 la regulación del 30 mostró el mayor coeficiente con 88,4 %; el mayor de todas las evaluaciones.
- ❖ Las mejores regulaciones por máquinas son el 20 % para la Western # 3 y Urapivot # 22, así como el 30 % para la Western # 11 con las que se logró el mayor por ciento del área regada adecuadamente (ARA) con 66,67, 65,21 y 69,94 % respectivamente y es la Western # 11 la de mejores resultados de las tres evaluados

Recomendaciones

- 1- Presentar los resultados de este trabajo a la dirección de la Empresa Agropecuaria Horquita para que sean tenidos en cuenta en la planificación del riego del cultivo de la papa
- 2- Generalizar el estudio de la uniformidad del riego al resto de las máquinas de la Empresa

Bibliografía

- Alemán, C.; et al: (2001). Organización: Aspectos clave en la sostenibilidad de los sistemas de de riego y la eficiencia del uso del agua. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 12(3), 31-36.
- Allen, G. R.; et. al.: (2000). Center Pivot System Design. *The irrigation association*, (Second Edition). Retrieved from [www. Irrigation. Org](http://www.Irrigation.Org).
- Aragón, A.; Balberi, R.: (1994). *Fundamentos básicos de Agronomía*. Pueblo y Educación.
- Bordusky, J.P.; et. al.: (1992). Irrigation Managemet with LEPA Systems. *Trans .ASAE*, 35(3), 879 - 884.
- Bremond, B.; Molle, B.: (1995). "Characterization of rainfall under center pivot: influence of measuring procedure". *Irrigation and Drainage. England. Eng*, 121(5).
- Cárdenas, L.; et. al.: (1999). Deflectores para las Boquillas difusoras empleadas en las maquinas de riego por aspersión. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 6, 8.
- Dillehay, T.D.; et. al.: (2005). "Preceramic irrigation canals in the Peruvian Andes". *Proceedings of the National Academy of Sciences*. . Retrieved from. Retrieved from <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?tool=pmcentrez&artid=1>.
- Domínguez, G.; et. al.: (1998). Maquina de riego por aspersión de pivote central hidráulica, de baja presión con colgantes. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 7(1), 56 - 58.
- Dueñas, R. ; Alonso, N.:k. (1981). *El Riego* (Primera.). Instituto Cubano del Libro La Habana. Cuba.
- García, R.J.; et. al.: (1996.). *El Riego*. (Primera.). La Habana. Cuba: Pueblo y Educación.
- Gilley, J.R.; Mielke, Ll. N.: (1980). Conserving Energy with Low-Pressure. *Center Pivot Journal of Irrigation and Drainage Division*, 49 - 58.
- Glenn J.; et. al.: (1994). Advanced Irrigation Engineering. *International Water Irrigation Review*, 14(2), 24-29.

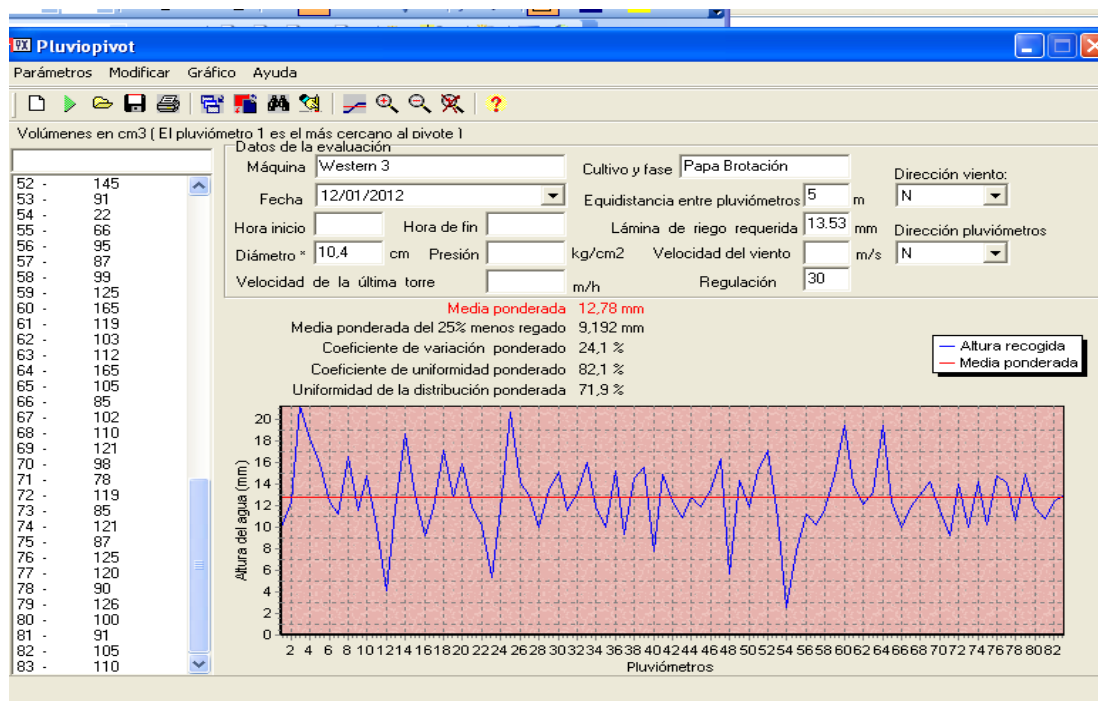
- González, P., Navarro. R.: (1999). Programa de computación "Pivot" para el cálculo de la distribución de boquillas y aspersores en las máquinas de pivote central. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 8(2), 33-35.
- González, P.: (2005). Manual para el diseño y operación de máquina de pivote central. Instituto de investigación de riego y drenaje Ministerio de la Agricultura.
- Heermann, D.F.; Hein P. R.: (1968). Performance characteristics of self-propelled center pivot sprinkler irrigation systems. *Trans of the ASAE*, 2(1).
- IIRD. (2012). Áreas bajo riego por técnicas. Instituto de Investigaciones en Riego y Drenaje. La Habana. Cuba. Retrieved from <http://www.iird.gov.cu>.
- Jiménez, E.R.; et. al.: (2010). Estudio de la uniformidad de riego, en una máquina de pivote central. *Revistas Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(3), 5.
- Keller, J.; Bliesner, R. D.: (1990). Sprinkle and Trickle Irrigation. *Van Nostrand Reinhold*, 652.
- Lyle P.; Butter, G.: (1980). Low energy labor from texas pivot. *Irrigation Farmer*, 7(4), 4.
- Martínez, J.; et. al.: (2001a). *Evaluación del sistema de riego por aspersión en pivote central, instalado en Chapingo México* (p. 14). México: Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Meloye . M.; R. .. (1998). *El Riego* (Primera Edición.). La Habana. Cuba: Instituto Cubano del Libro.
- Meloye, M.; Robeur, H.: (1974). *El Riego*. La Habana. Cuba: Instituto Cubano del Libro.
- Montero, J. M. et. al.: (1999). Influencia de la altura del emisor sobre la eficiencia y uniformidad en el reparto de agua con Pivots (pp. 227-234). Presented at the XVII Congreso nacional de riegos, Murcia. España: AERYD. Murcia.
- Pacheco, J., et. al.: (2003). In *Memorias en CD de la II Conferencia Internacional sobre Desarrollo Agropecuario y Sostenibilidad*. Presented at the Presentado en el Simposio de Ingeniería Agrícola. Universidad. Central de Las Villas, Santa Clara. Cuba: Universidad Central de Las Villas.
- Pacheco, J.; et. al.: (2006). *Riego y Drenaje* (Segunda.). La Habana. Cuba: Félix Varela.

- Pacheco, Y.; pacheco, J.: (2004). Aplicación de software "Pluviopivot" para el cálculo de coeficientes de uniformidad ponderados por superficie en máquinas de riego de pivote central. Universidad Central de las Villas (UCLV) Villa Clara, Cuba,
- Pérez L. R.: (2004). El riego de los pivotes y su impacto ambiental en Cuba: reflexiones. *Revista Ingeniería Hidráulica y ambiental*, 15(2), 8.
- Pérez, J. R.: (1998). *Un Manual de Práctica Laboral de riego y drenaje para estudiantes de 4to año de Agronomía*. Tesis presentada en opción al Título de M.Sc. en Riego y Drenaje., Instituto Superior de Ciencias Agrarias de La Habana.
- Pérez, L. R.; et. al.: (2001). Boquilla Difusora Cubana: Criterios para el diseño hidráulico de los pivotes. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(1), 18-26.
- Rodríguez, E. y Correa T.: (2005). Evaluación Técnico Económica de un Sistema de Riego por Pivote Central. *Agro Sur*, 33(2). Retrieved from Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile.
- Sourell, H.: (1985). Desarrollo y uso del riego por goteo móvil. *Drip/Trickle Irrigation in Action*, 597-602.
- Tarjuelo J.M.: (1999). *El Riego por Aspersión y su Tecnología*. Mundi- Prensa. Madrid.
- Tarjuelo J.M.: (2005). *El Riego por Aspersión y su Tecnología* (Tercera.). Mundi- Prensa. Madrid.

Anexos

Evaluación de la máquina Western 3

Primera evaluación

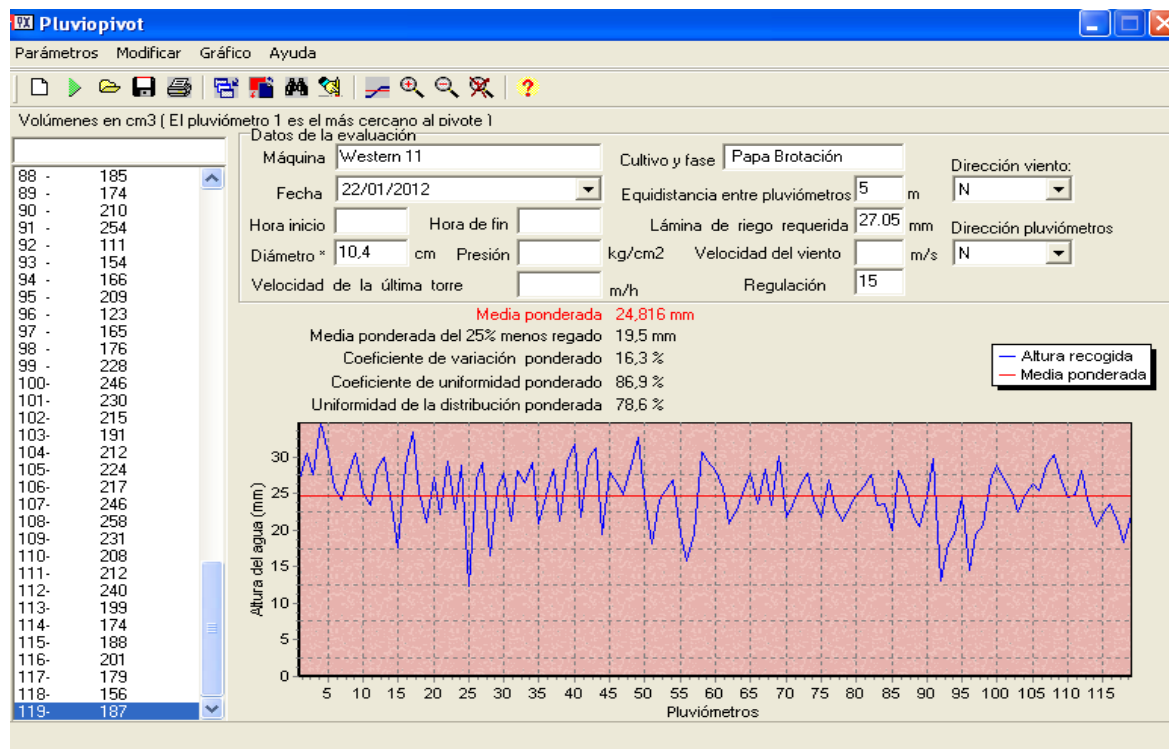


Segunda evaluación

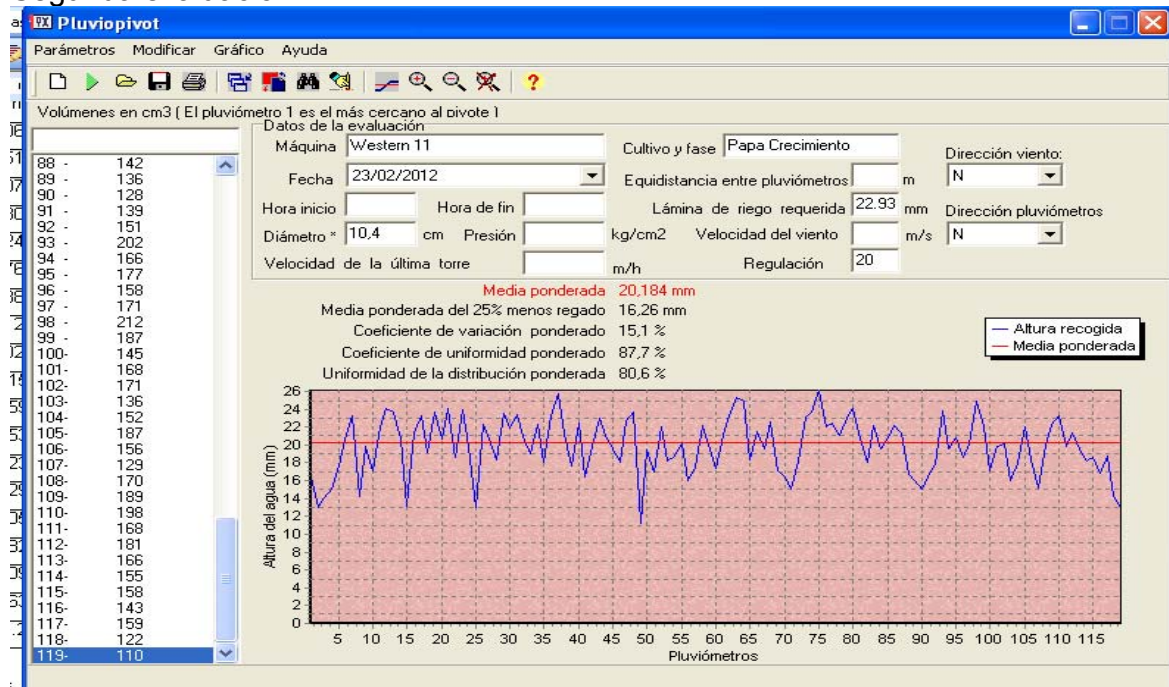


Evaluación de la máquina Western 11

Primera evaluación

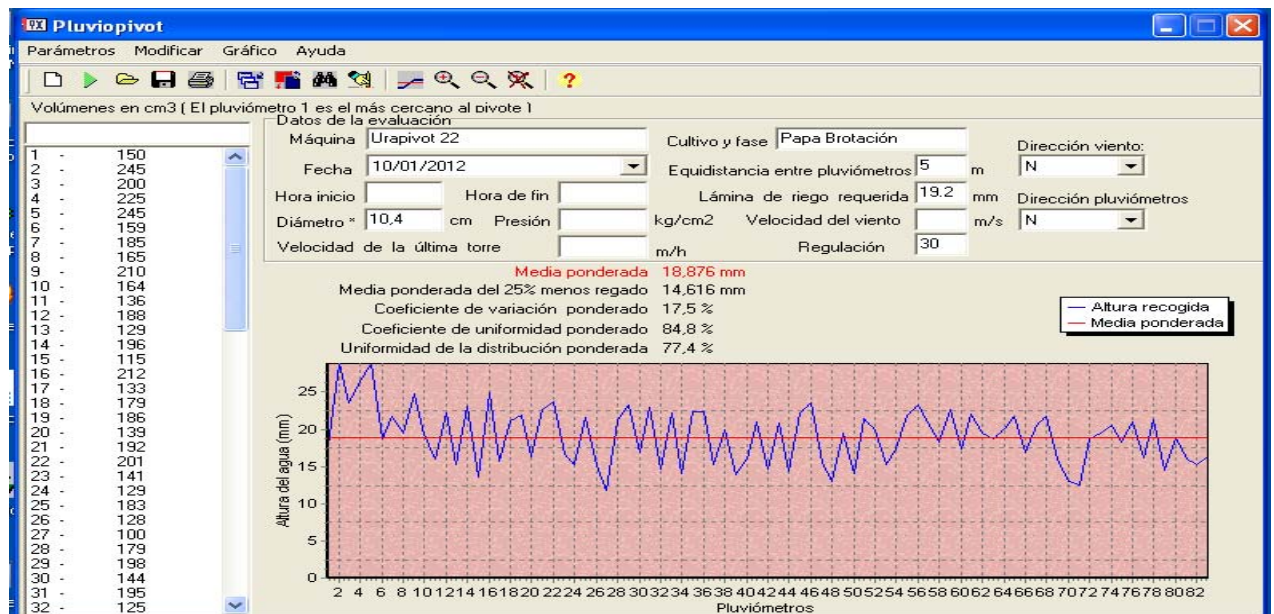


Segunda evaluación



Evaluación de la máquina Urapivot 22

Primera evaluación



Segunda evaluación

