

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



Efecto De La Velocidad Del Viento En La Uniformidad De Distribución Del Riego
Por Aspersión

Por:

JUAN CARLOS VÁZQUEZ HERNÁNDEZ

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero Agrónomo en Irrigación

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Efecto De La Velocidad Del Viento En La Uniformidad De Distribución Del Riego
Por Aspersión

Por:

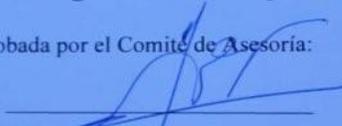
JUAN CARLOS VÁZQUEZ HERNÁNDEZ

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero Agrónomo en Irrigación

Aprobada por el Comité de Asesoría:

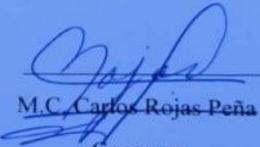

M.C. Gregorio Briones Sánchez

Asesor Principal


M.C. Tomás Reyna Cepeda

Coasesor




M.C. Carlos Rojas Peña

Coasesor


M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2022.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Efecto De La Velocidad Del Viento En La Uniformidad De Distribución Del Riego
Por Aspersión

Por:

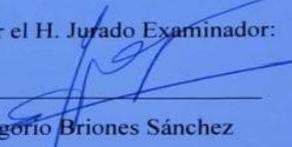
JUAN CARLOS VÁZQUEZ HERNÁNDEZ

Tesis

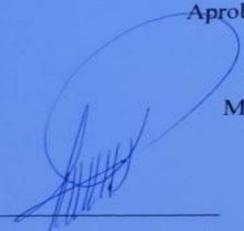
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero Agrónomo en Irrigación

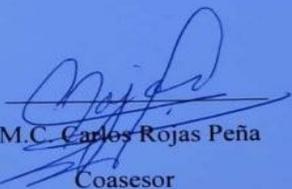
Aprobada por el H. Jurado Examinador:


M.C. Gregorio Briones Sánchez

Asesor Principal


M.C. Tomás Reyna Cepeda

Coasesor


M.C. Carlos Rojas Peña

Coasesor


M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería



Saltillo, Coahuila, México

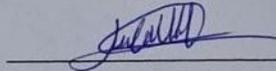
Diciembre 2022.

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es responsable directo, jura bajo protesta decir la verdad, que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (copiado y pegado); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comparar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como copia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin comillas; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. En este sentido, lo anterior puede ser confirmado por el lector, estando consciente de que, en caso de comprobarse plagio en el texto, no respetar los derechos de autor, edición o modificación, será sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias generadas en caso de existir cualquier tipo de plagio y declaro que este trabajo es original.

Autor principal



Juan Carlos Vázquez Hernández

DEDICATORIA

A mis padres, Guadalupe Vázquez Díaz y Matilde Hernández Jiménez.

Ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanza, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches difíciles durante mis horas de estudio, siempre han sido mis mejores ejemplos a seguir en la vida. Hoy cuando concluyo mis estudios les dedico a ustedes este logro mis amados padres, como un meta más conquistado. Orgulloso de tener a unos padres ejemplares como ustedes en mi vida y estar a mi lado siempre en los momentos importantes en mi vida.

Gracias por ser quienes son y por creer siempre en mí.

A mis hermanos y hermanas, Reyna, José Luis, María Flor, María Rosalinda, Hugo Caralampio y Olga Guadalupe.

Agradecerles por todo el amor, apoyo y cariño incondicional durante todo este proceso, y por estar conmigo en todo momento gracias. A toda la familia porque con sus oraciones, consejos de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

A mis abuelos Francisco y Andrea (en paz descansen).

Fueron las personas después de mis padres y hermanos que más se preocuparon por mí, me enseñaron cosas muy importantes en la vida inculcándome siempre en salir adelante a pesar de las dificultades ellos me encaminaron por un buen sendero.

A mi cuñado **Jean Carlos Trejo Vázquez** por todo el apoyo a la familia en los momentos difíciles.

A **María Rosibeth**, por las palabras de alientos y ánimos para salir adelante en los momentos difíciles durante mi formación académica.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por abrirme las puertas y brindarme las herramientas, conocimientos y enseñanzas necesarias para mi formación académica profesional.

A mis padres, hermanos y hermanas los cuales me brindaron la oportunidad y apoyo durante todo el periodo de la carrera. Ellos siempre me motivaron a seguir adelante con mis estudios, además sin la colaboración de toda la familia este logro no sería posible.

A los departamentos de Riego y Drenaje el cual fue el encargado de brindarme los conocimientos sobre la especialidad y de darle dirección a mi formación académica.

A mis asesores M.C. Gregorio Briones Sánchez por sus conocimientos, disposición y colaboración en la presente investigación.

M.C. Tomas Reyna Cepeda, por su apoyo, disposición y colaboración con la presente investigación.

M.C. Carlos Rojas Peña, por su apoyo, disposición y colaboración con la presente investigación.

Dr. Alejandro Zermeño Gonzales, por su apoyo y colaboración de la presente investigación.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO.

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO.....	III
ÍNDICE DE CUADROS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVO	5
2.1 Objetivos específicos	5
2.2 Hipótesis.....	5
3. REVISIÓN DE LITERATURA	6
3.1 El riego por aspersión.....	6
3.2 El agua en la agricultura.....	6
3.3 Elección del método de riego.....	6
3.4 Componentes de un equipo de riego por aspersión.....	7
3.5 Determinación de las necesidades de bombeo	9
3.5.1 Determinar el caudal (Q) necesario y la presión requerida.	9
3.6 Clasificación de los sistemas de riego por aspersión.	10
3.6.1 Sistema móvil	11
3.6.2 Sistemas semifijos	12
3.6.3 Sistema fijo.....	12
3.6.4 Pivotes y laterales	13
3.6.5 Emisores para reducir los efectos del viento.....	13
3.6.6 Cañón de riego.....	14
3.6.7 Laterales de avance frontal.....	14
3.7 Ventaja de los sistemas de riego por aspersión.....	15
3.8 Desventajas del riego por aspersión.....	15
3.9 Aspersores	16

3.9.1	Los elementos de aplicación del agua en aspersión son emisores de varios tipos:	16
3.9.2	Aspersor de turbina.....	16
3.9.3	Factores que afectan la eficiencia en riego por aspersión.	16
3.9.4	Características del aspersor.	17
3.10	Clasificación de los aspersores de acuerdo a la presión de trabajo.....	18
3.11	Adaptabilidad del riego por aspersión.....	18
3.12	Coefficiente de uniformidad de riego por aspersión	19
3.13	Criterio de uniformidad de Christiansen	20
3.13.1	Criterio de uniformidad de Wilcox.....	21
3.14	Marco o disposición conjunta de los aspersores	22
3.15	Distribución del agua sobre el suelo.	23
3.16	Causas de baja uniformidad	24
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
4.1	Materiales y equipos requeridos.....	25
4.2	Prueba de Pluviometría.	27
4.3	Metodología de análisis.....	30
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
5.1	Evaluación de la uniformidad de distribución para cuatro aspersores de impacto a medio círculo probados al aire libre a diferentes espaciados.	32
5.2	Efecto de la velocidad del viento sobre la uniformidad de distribución dentro del patrón trasladado de aspersión.	32
5.3	Comparación de los Coeficientes de Uniformidad Afectados por el Viento. ...	42
6.	CONCLUSIONES.....	50
6.1	Propuesta de mejora para el uso del aspersor.....	50
7.	BIBLIOGRAFÍA	51
8.	ANEXOS	55

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Datos de manufactura del aspersor.	17
Cuadro 2.	Datos de desempeño del aspersor P5-R.	18
Cuadro 3.	Valores de CU de Rain Bird.	22

Cuadro 4. Efecto de reducción del viento.....	23
Cuadro 5. Datos climáticos registrados durante la prueba.....	30
Cuadro 6. Valores de CU calculados con el método de Christiansen, en los diferentes espaciamientos y velocidades del viento.	43
Cuadro 7. Valores de CU calculados con el método de Wilcox, en los diferentes espaciamientos y velocidades del viento.	43
Cuadro 8. Datos de pluviometría recolectados en campo para la prueba 1 y 2.	55
Cuadro 9. Datos de la pluviometría calculados, traslape a 12 x 12 m prueba 1.	56
Cuadro 10. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 15 m prueba 1.	56
Cuadro 11. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 18 m prueba 1.	56
Cuadro 12. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 21 m prueba 1.	57
Cuadro 13. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 9 m prueba 1.	57
Cuadro 14. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 12 m prueba 1.	57
Cuadro 15. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 15 m prueba 1.	58
Cuadro 16. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 18 m prueba 1.	58
Cuadro 17. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 12 m prueba 2.	58
Cuadro 18. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 15 m prueba 2.	59
Cuadro 19. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 18 m prueba 2.	59
Cuadro 20. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 21 m prueba 2.	59
Cuadro 21. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 9 m prueba 2.	60
Cuadro 22. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 12 m prueba 2.	60
Cuadro 23. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 15 m prueba 2.	60
Cuadro 24. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 18 m prueba 2.	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de un sistema de riego por aspersión.	7
Figura 2. Alturas de succión y descarga de un riego por aspersión.	8
Figura 3. Aspersor de impacto Rain Bird.....	17
Figura 4. Localización geográfica del jardín hidráulico (Google Eart)	25
Figura 5. Localización del suministro de agua.....	25
Figura 6. Estación meteorológica.....	26
Figura 7. Armado de estacas porta vasos	27
Figura 8. Arreglo de los colectores en una cuadrícula de 3 x 3 m.	28
Figura 9. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 12 m con una velocidad del viento de 2.479 m/s.	33
Figura 10. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 15 m con una velocidad del viento de 2.479 m/s.	33
Figura 11. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 18 m con una velocidad del viento de 2.479 m/s.	34
Figura 12. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 18 m con una velocidad del viento de 2.479 m/s.	35
Figura 13. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 9 m con una velocidad del viento 2.647 m/s.	35
Figura 14. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 12 m con una velocidad del viento de 2.647 m/s.	36
Figura 15. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 15 m con una velocidad del viento de 2.647 m/s.	36
Figura 16. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 18 m con una velocidad del viento de 2.647 m/s.	37
Figura 17. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 12 m con una velocidad del viento de 1.871 m/s.	38
Figura 18. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 15 m con una velocidad del viento de 1.871 m/s.	38
Figura 19. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 18 m con una velocidad del viento de 1.871 m/s.	39

Figura 20. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 21 m con una velocidad del viento de 1.871 m/s.	40
Figura 21. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 9 m con una velocidad del viento de 1.992 m/s.	40
Figura 22. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 12 m con una velocidad del viento de 1.992 m/s.	41
Figura 23. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 15 m con una velocidad del viento de 1.992 m/s.	41
Figura 24. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 18 m con una velocidad del viento de 1.992 m/s.	42
Figura 25. Tendencia de los valores de CU calculados con espaciados a 12 x 12, 12 x 15, 12 x 18 y 12 x 21 m con el método de Christiansen.	45
Figura 26. Tendencia de los valores de CU calculados con espaciados a 9 x 9, 9 x 12, 9 x 15 y 9 x 18 m con el método de Christiansen.	45
Figura 27. Tendencia de los valores de CU calculados con espaciados a 12 X 12, 12 x 15, 12 x 18 y 12 x 21 m con el método de Wilcox.	46
Figura 28. Tendencia de los valores de CU calculados con espaciados a 9 X 9, 9 x 12, 9 x 15 y 9 x 18 m con el método de Wilcox.	46
Figura 29. Efecto del viento en los coeficientes de uniformidad % CUC calculados con el método de Christiansen para los traslapes a 9 x 9, 9 x 12, 9 x 15 y 9 x 18 m.	47
Figura 30. Efecto del viento en los coeficientes de uniformidad % CUW calculados con el método de Wilcox para los traslapes a 9 x 9, 9 x 12, 9 x 15 y 9 x 18 m.	48
Figura 31. Efecto del viento en los coeficientes de uniformidad % CUC calculados con el método de Christiansen para los traslapes a 12 x 12, 12 x 15, 12 x 18 m.	48
Figura 32. Efecto del viento en los coeficientes de uniformidad % CUC calculados con el método de Wilcox para los traslapes a 12 x 12, 12 x 15, 12 x 18 m.	49
Figura 33. Estimación lineal del grado de coincidencia de los valores de % CUC de Christiansen en correlación con los % CUH de Hart y loa valores % CUW de Wilcox.	49

Efecto De La Velocidad Del Viento En La Uniformidad De Distribución Del Riego Por Aspersión

Por: Juan Carlos Vázquez Hernández

RESUMEN

Esta investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, realizado los días 25 y 26 de mayo del 2022. Con la finalidad de evaluar la uniformidad de distribución de riego por aspersión, el experimento se realizó con espaciamientos de, 12 x 12, 12 x 15, 12 x 18, 12 x 21 m y 9 x 9, 9 x 12, 9 x 15 y 9 x 18 m entre aspersores trabajado a medio giro (180°), la evaluación de los datos de la pluviometría fueron recolectados en horarios diferentes durante el día para cada prueba, esto con el objetivo de evaluar el efecto de la velocidad del viento en la uniformidad de distribución del riego por aspersión con velocidades de viento menores a 2.5 m/s y mayores a 2.5 m/s, se colocaron 40 botes recolectores con una cuadrícula a (3*3m) entre sí.

Los volúmenes colectados por recipientes dentro del área de cobertura de los aspersores varia conforme la distancia de los aspersores aumenta, por lo mismo para obtener una distribución aceptable el patrón de pluviometría de los aspersores adyacentes fue combinada para calcular la cantidad colectada al ensayar los traslapes.

Las funciones estadísticas disponibles en las herramientas de Excel permitieron calcular fácilmente en coeficiente de uniformidad de Wilcox (CUW) y con la aplicación de la fórmula de Hart se puede abreviar el cálculo del coeficiente de uniformidad de Christiansen para estimarlo como: $\% CUC = 100 - 0.7979 * CV$.

Al incrementarse la velocidad del viento disminuye el coeficiente de uniformidad, y la tendencia lineal negativa se puede representar por una ecuación de regresión del tipo: $\% CUC = a - b * \text{velocidad del viento}$.

Palabras clave: Coeficiente de Uniformidad, Velocidad del viento, Pluviometría, Riego por aspersión.

Clave del proyecto: 38111-425401001-423

Effect of Wind Speed on Sprinkler Irrigation Distribution Uniformity

By: Juan Carlos Vázquez Hernández

ABSTRACT

This research was carried out at the facilities of the Antonio Narro Autonomous Agrarian University (UAAAN), Buenavista, Saltillo, Coahuila, Mexico, carried out on May 25 and 26, 2022. In order to evaluate the uniformity of irrigation distribution by Aspersión, the experiment was carried out with spacings of 12 x 12, 12 x 15, 12 x 18, 12 x 21 m and 9 x 9, 9 x 12, 9 x 15 and 9 x 18 m between sprinklers worked at half a turn (180°), the evaluation of the rainfall data were collected at different times during the day for each test, with the aim of evaluating the effect of wind speed on the uniformity of sprinkler irrigation distribution with wind speeds less than 2.5 m/s and greater than 2.5 m/s, 40 collecting boats were placed with a grid (3*3m) apart.

The volumes collected by containers within the coverage area of the sprinklers vary as the distance from the sprinklers increases, therefore, to obtain an acceptable distribution, the rainfall pattern of the adjacent sprinklers was combined to calculate the amount collected when testing the overlaps.

The statistical functions available in the Excel tools made it possible to easily calculate the Wilcoxon uniformity coefficient (CUW) and with the application of Hart's formula, the calculation of the Christiansen uniformity coefficient can be abbreviated to estimate it as: $\% \text{ CUC} = 100 - 0.7979 * \text{CV}$.

As wind speed increases, the uniformity coefficient decreases, and the negative linear trend can be represented by a regression equation of the type: $\% \text{ CUC} = a - b * \text{wind speed}$.

Keywords: Uniformity coefficient, Wind speed, Rainfall, Sprinkler irrigation.

Project key: 38111-425401001-423

1. INTRODUCCIÓN

Se conoce que el 75% de la superficie que rodea el manto terrestre de nuestro planeta está constituido por agua; sin embargo, apenas un 2.5% es agua dulce, es decir apta para el consumo humano y el 97.5% es agua salada no apta para el consumo. El agua es un recurso hídrico muy indispensable para la vida humana, plantas y animales, por lo que la preocupación de que este recurso se agote, lo cual esto se ha incrementado globalmente. Dicho recurso es empleado en grandes cantidades para el desarrollo del sector agrícola, por lo que es necesario implementar diseños de riego que permitan administrar el agua eficientemente para su conservación.

El sector agrícola realiza el mayor consumo de agua en el mundo y por tanto la agricultura irrigada debe ser eficiente para tener sostenibilidad ambiental y económica. Un parámetro principal para evaluar sistemas de riego es la uniformidad de aplicación de agua en la superficie del área irrigada, reflejándose directamente en el manejo y desempeño del cultivo, en la calidad y cantidad de los productos, en la eficiencia del uso del agua, en el costo del riego y por tanto la producción (Bernardo et al, 2009).

Los sistemas de riego desempeñan un papel muy importante en la etapa de la producción agrícola en la actualidad, por ello es que cada vez los agricultores, recurren a la busca de nuevos sistemas más adecuados para garantizar sus utilidades y disminuir sus costos de producción, a la vez ayudar a contribuir a la conservación del agua para su mejor uso.

Los sistemas de riego por aspersión fijo o estacionario, se caracterizan principalmente por su adaptación a terrenos con mucha pendiente, irregulares o de difícil acceso, debido a que cuenta con esta gran ventaja de este método de riego, se han estado implementando su uso con mayor frecuencia en diferentes partes del país, principalmente en el sur de nuestro estado.

Así como también una de las desventajas que puede presentar los sistemas de riego es la operación y el mantenimiento preventivo que se puede requerir para garantizar el buen funcionamiento del sistema, lo antes mencionado si no se llega a cumplir correctamente con las acciones, puede ocasionar problemas como son: Obstrucciones

en las líneas de tuberías, problema de presión, roturas de tuberías, fugas, taponamiento, entre otros. Todo esto puede ocasionar una reducción de la vida útil del sistema, del equipo y materiales, generando costos en las reparaciones y gastos innecesarios al productor.

Realizando una correcta operación y mantenimiento adecuado al sistema, garantiza el buen funcionamiento del equipo, debido a que, si en algún momento llega a fallar el sistema por alguna mala operación, afectaría a todo por lo que puede llegar a parar todas las actividades, sometiendo al cultivo a un estrés hídrico hasta poder reparar el daño ocasionado.

El propósito de este trabajo de investigación es que sea útil como apoyo y material de consulta para estudiantes o productores, que tengan algún interés acerca del tema.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivos específicos

Medir la pluviometría en riego por aspersión estacionario a diferentes espaciamientos.

Evaluar los coeficientes de distribución de acuerdo los rangos establecidos en los criterios de evaluación.

Registrar la velocidad del viento para evaluar su efecto en la (UD) mediante una estación meteorológica.

Determinar que traslape entre aspersores, es el más adecuado para tener un coeficiente de uniformidad aceptable mediante el uso del programa Excel.

2.2 Hipótesis

Ho: Vientos $<$ a 2.5 m/s no causan reducciones significativas en la uniformidad.

Ha: Velocidades del viento \geq a 2.5 m/s distorsionan significativamente los patrones de aspersión reduciendo la uniformidad.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 El riego por aspersión.

Tarjuelo (2005), define que el riego por aspersión se trata de la aplicación de agua a presión, más o menos intensa y uniforme sobre la parcela con el objetivo de que el agua se infiltre en el mismo punto donde cae.

Tanto los sistemas de aspersión como los de goteo utilizan dispositivos de emisión o descarga en los que la presión disponible en las tuberías porta emisores (ramales, alas o laterales de riego) induce un caudal de salida. La diferencia entre ambos métodos radica en la magnitud de la presión y en la geometría del emisor que utiliza cada método para la aplicación del riego.

3.2 El agua en la agricultura.

El uso del agua para fines agrícolas es un tema central en cualquier debate sobre los recursos hídricos y la seguridad alimentaria. En promedio, en la agricultura se ocupa el 70 % del agua que se extrae en el mundo, y las actividades agrícolas representan una proporción aún mayor del "uso consuntivo del agua" debido a la evapotranspiración de los cultivos. A nivel mundial, más de 330 millones de hectáreas cuentan con instalaciones de riego. La agricultura de regadío representa el 20 % del total de la superficie cultivada y aporta el 40 % de la producción total de alimentos en todo el mundo.

3.3 Elección del método de riego.

La elección del método de riego más adecuado se realiza en función de los siguientes factores:

3.4 Componentes de un equipo de riego por aspersión.

Autor: Peralta.; Simpfendörfer (2001).

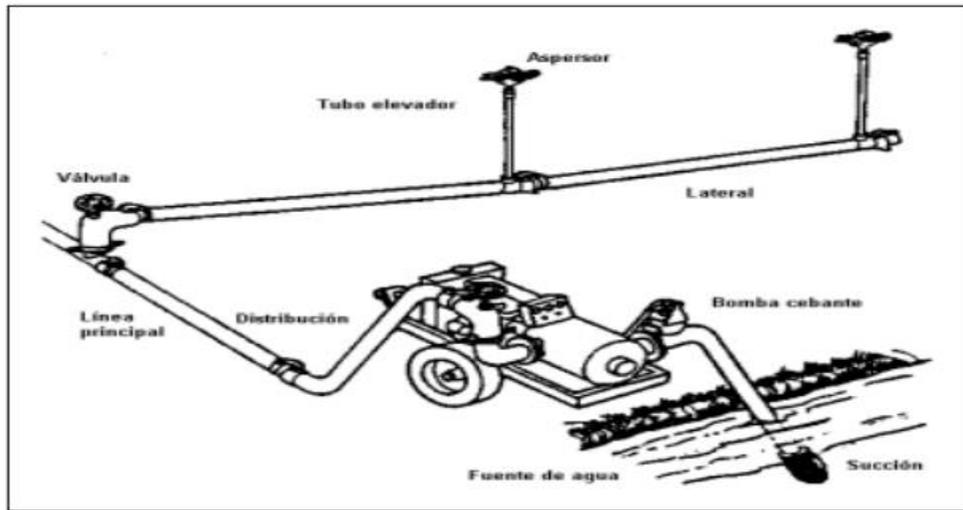


Figura 1. Componentes de un sistema de riego por aspersión.

Las componentes básicas que componen el sistema de riego son: el equipo de bombeo, las tuberías principales con sus hidrantes, los ramales o laterales de riego y los propios emisores. Estos últimos pueden ser: tuberías perforadas, difusores fijos o toberas y aspersores.

Reservorio: se refiere a estructuras hidráulicas que se construyen para almacenar, regular y sedimentar el agua del riego.

Equipo de bombeo: se trata de una bomba hidráulica accionada por un motor que extrae agua al producir un vacío y la impulsa a presión que manda hacia las tuberías, en algunas condiciones este equipo no resulta necesario cuando se cuenta con una presión natural por estar elevado el almacenamiento de agua realizando una conducción a base de presión por la diferencia de altura.

Red de tuberías: estos pueden ser de tubo metálico o de materiales plásticos PVC por el cual se conduce el agua hasta distribuirla a los aspersores o emisores.

Aspersores: se refiere a un mecanismo mediante el cual el agua a presión se convierte en gotas o lluvias menudas que se esparcen uniformemente sobre las plantas o el terreno.

Accesorios: son los componentes que tienen como función de realizar la unión de los tubos o también tienen como función de hacer una reducción de diámetros a los tubos.

El proceso de aplicación de agua de un aspersor consiste en un chorro de agua a gran velocidad 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 (Peralta.; Simpfendörfer, 2001).

Autor: Peralta.; Simpfendörfer (2001)

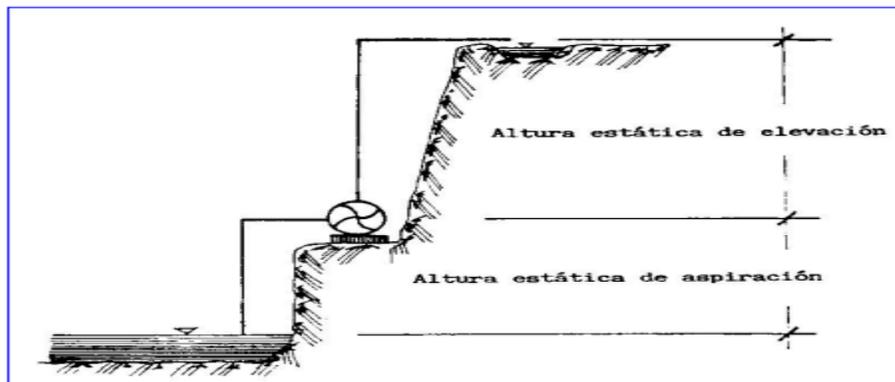


Figura 2. Alturas de succión y descarga de un riego por aspersión.

Altura geométrica de succión (H_a): Es la distancia vertical existente entre el nivel del agua succionada y el centro o eje de la bomba.

Altura geométrica de descarga (H_i): Es la distancia vertical entre el centro de la bomba y el punto más alto de la tubería de descarga.

Altura geométrica total (H_t): Es la suma de la altura geométrica de succión y la altura geométrica de descarga.

Peralta y Simpfendörfer (2001), mencionan para que una bomba pueda levantar el agua con una determinada presión a una o más salidas (aspersores), se necesita efectuar suficiente trabajo que permite superar la altura geométrica de succión y la altura geométrica de descarga. En el trayecto hay pérdidas de carga producidas por el rozamiento del agua en la tubería y en los (codos, tees, etc.) que también deben ser considerados. La experiencia ha demostrado que las pérdidas de carga en piezas

especiales, como codos, tees, válvulas, otros, en general nunca superan el 20% de las pérdidas de carga totales de la tubería.

3.5 Determinación de las necesidades de bombeo

3.5.1 Determinar el caudal (Q) necesario y la presión requerida.

El caudal se define en el diseño agronómico, la presión requerida por el sistema se define en el estudio hidráulico.

Peralta et al. (2001), menciona un criterio para determinar el diámetro es a través de la velocidad del agua. Debemos evitar tener en nuestra tubería una velocidad excesiva (podría haber golpe de ariete). Es recomendable elegir un diámetro y un tipo (PVC, asbesto-cemento, polietileno, aluminio, otros) de tubería donde el agua no alcance una velocidad de más de 2 m/s.

La velocidad de cualquier caudal elegido alcanza con un determinado diámetro de tubería, está dada por la siguiente ecuación.

$$V = Q/S = 4*Q/\pi*D^2$$

V = Velocidad (m/s).

Q = Caudal (m³/s).

D = Diámetro de la tubería (m).

Calcular las pérdidas de carga unitarias en la tubería expresándola en metros.

$$J = 10.665*((Q^{1.852})/(C^{1.852}*D^{4.869}))$$

donde,

J = Pérdida de carga por m de tubería.

Q = Caudal (m³/s).

D = Diámetro interno (m).

C = Coeficiente de rugosidad (depende del material).

Luego de obtener la pérdida de carga unitaria, es necesario obtener las pérdidas por cada tramo de diámetro similar.

Obtener la longitud de la tubería, por diámetro y multiplicando por pérdida de carga unitaria.

$$H_p = L_t * J$$

H_p = Pérdidas de carga en tuberías (m).

L_t = Longitud total por diámetro tubería (m).

J = Pérdidas de carga por (m).

Luego, deben calcularse las pérdidas de carga totales en la tubería (H_{pt}) sumando las pérdidas obtenidas por tramo de diferente diámetro. Este cálculo debe incluir la tubería de succión, de conducción y de distribución.

Posteriormente, se estiman las pérdidas de carga en accesorios (H_s) como:

$$H_{pt} / X = 100\% / 20\%, x = H_s = 0.2 H_{pt}$$

Finalmente, la altura total de elevación será:

$$H_t = H_a + H_i + H_{pt} + H_s = H_a + H_i + H_{pt} + 0.2 H_{pt}$$

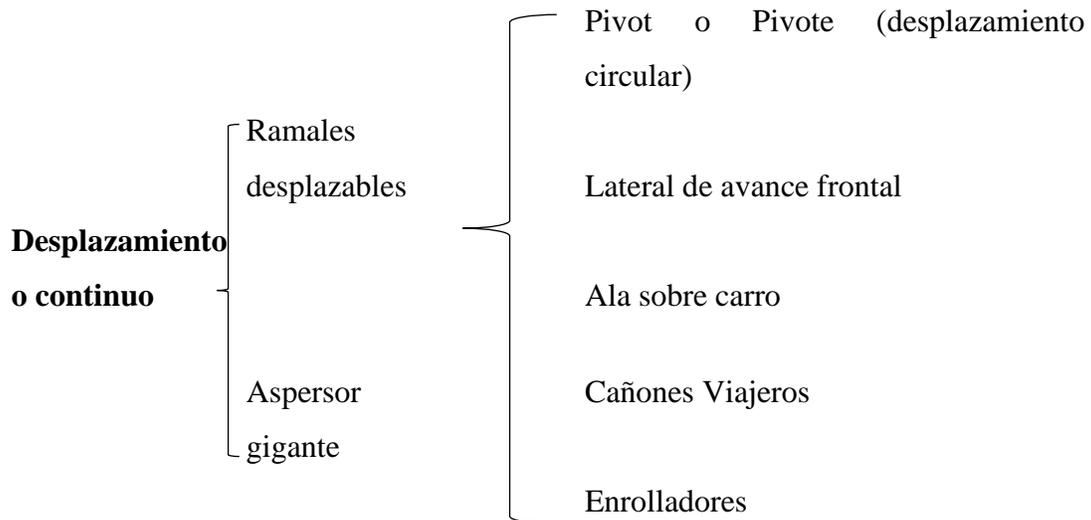
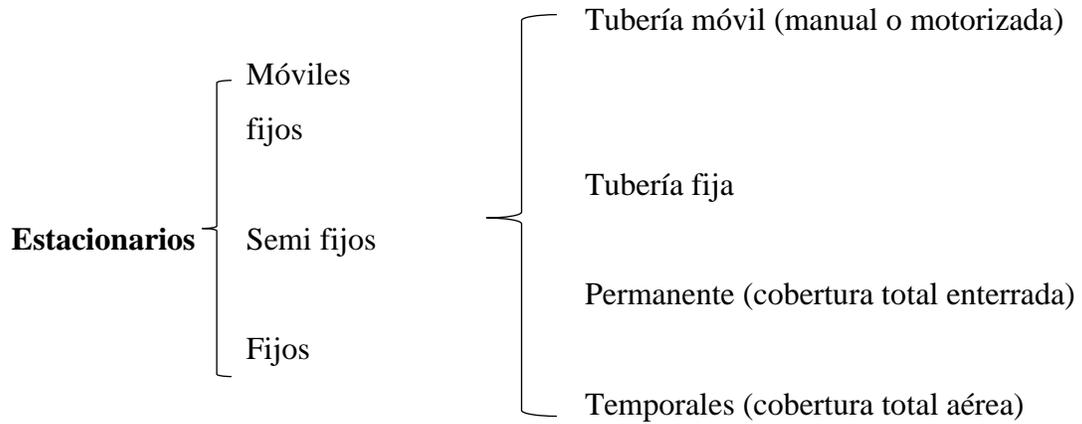
El valor aquí obtenido indica, la altura mínima en metros, que la bomba debe superar para llegar al punto requerido con el caudal seleccionado.

3.6 Clasificación de los sistemas de riego por aspersión.

Resulta conveniente clasificar los tipos de sistemas de aspersión en función de la movilidad de los diferentes elementos del sistema, ya que facilita la comprensión de su funcionamiento y puede proporcionar una idea de los gastos de inversión necesarios para adquirir en la compra de algunos equipos (Tarjuelo 2005).

Los sistemas de riego por aspersión se clasifican en dos grandes familias: los estacionarios, que permanecen fijos mientras riegan, y los de desplazamiento continuo

que riegan mientras realizan aplicación del agua.



3.6.1 Sistema móvil

Macias et al, (2011), define a los sistemas de riego por aspersion dentro de la clasificación de sistemas estacionario. En este caso todos los elementos de la instalación son móviles, incluso puede serlo el grupo de bombeo. Los ramales de riego suelen ser de aluminio de PVC y se instalan sobre la superficie del terreno. Cuando

acaba el riego de una sección, los ramales con los aspersores se trasladan a la siguiente posición, requiriendo por ello una gran cantidad de mano de obra para el riego.

Estos equipos suelen ser instalados para aplicar riegos eventuales o como soluciones de emergencia. Se compone de un grupo de motobomba móvil (puede ser accionado desde la toma de fuerza del tractor) que envía agua a una tubería en la que están colocados los aspersores.

3.6.2 Sistemas semifijos

Es estos sistemas son fijos el grupo de bombeo y la red de tuberías principales, que normalmente se encuentran enterrada. Esta red de tubería principal normalmente suele ser de PVC o en ocasiones de fibrocemento, de ella derivan los hidrantes en donde se conectan los ramales de distribución (fijos o móviles), a los que se conectan los ramales de riego, que son móviles. Estos ramales deben ser fácilmente transportables por lo que suele ser de materiales ligeros y que soporten bien al estar a la intemperie (aluminio, polietileno). A los ramales se acoplan a los aspersores directamente, o bien a través de unas mangueras.

3.6.3 Sistema fijo.

Todos los elementos de este sistema son fijos (bombeo, red de tubería y emisores), salvo en algunos casos donde los aspersores son desmontables y van ocupando sucesivas posiciones a lo largo de los ramales de riego. La red de riego puede instalarse únicamente para la campaña o ser permanente. Dentro de los sistemas fijos, se pueden destacar dos tipos que son, los sistemas aéreos y los enterrados.

Los sistemas fijos aéreos constan de una red de tuberías principales enterradas y unos ramales de riego que se encuentran sobre el terreno. Estos ramales pueden ser trasladados a otras parcelas o a otra zona de la misma en función de la rotación de cultivos.

Los sistemas fijos enterrados se dominan comúnmente cobertura total enterrada y tienen toda la red de riego bajo la superficie del terreno. En este caso el diseño del

espaciamiento de riego más adecuado tiene mucha importancia, ya que no podrá ser modificado fácilmente.

3.6.4 Pivotes y laterales

Traxco (1991), menciona que los sistemas de riego Pivote y sistemas laterales o de avance frontal ofrecen ventajas con respecto a los sistemas de riego fijos o estacionarios en lo concerniente a los efectos del viento.

Los Pívots ocupan infinitas posiciones en su recorrido (en su movimiento de traslación) y, por tanto, cada punto se regará normalmente bajo distintas condiciones de viento en los riegos sucesivos, compensándose las distorsiones que hubieran podido producirse por el viento.

El espaciamiento de aspersores o emisores en la tubería principal del Pivote es bastante pequeño (distancia máxima entre salidas de 3 metros), solapándose perfectamente las áreas de riego de unos con otros.

3.6.5 Emisores para reducir los efectos del viento

Una desventaja de estos sistemas es la altura a la que se encuentran los aspersores con respecto al suelo (a 4 metros de altura) en comparación con los sistemas de cobertura, que se suelen encontrar a un máximo de 2 metros de altura con respecto al terreno. A mayor altura, lógicamente les afecta más la velocidad del viento. Para reducir esta desventaja, en los sistemas Pivote se utilizan aspersores de ángulo bajo (del orden de 8°), o se instalan bajantes para situar los emisores más cerca del suelo. La distancia más aconsejable es de 2 metros sobre el nivel del suelo, con lo que se consigue una disminución de las pérdidas por evaporación y arrastre por los efectos del viento de entre el 30 y el 40% de las existentes con los aspersores instalados arriba sobre la tubería principal del Pivote, al tiempo que se mantiene la uniformidad de riego.

El principal efecto del viento sobre el riego con sistemas Pivote es el cambio de superficie mojada que se presenta cuando el viento sopla en el mismo sentido que la dirección longitudinal de la máquina. Así, cuando el viento sopla hacia la cabeza o centro del Pivote, el área mojada disminuye alrededor de un 17%, mientras que cuando sopla hacia el voladizo o alero, el área mojada crece alrededor de un 19%.

3.6.6 Cañón de riego

El cañón motorizado de riego consta de un aspersor de gran alcance y caudal, montado sobre un carro o patín y conectado al suministro de agua mediante una manguera. Este sistema de riego utiliza aspersores rotativos de gran tamaño, que funcionan con una presión elevada, formando grandes gotas. Son adecuados para dar riegos de apoyo a cultivos con bajas necesidades de riego utilizando para praderas de zonas semihúmedas.

3.6.7 Laterales de avance frontal.

Este equipo es de estructura semejante al pivote, consiste en un ramal de riego montado sobre torres automáticas de las ruedas que se desplazan en sentido perpendicular al ramal de riego, riega superficies de forma rectangular.

La tubería porta aspersores, los emisores y los sistemas de propulsión son semejantes al pivote, sin embargo, la forma de suministrar agua al equipo y el mecanismo de alineamiento presentan diferencias respecto al equipo pivote. El suministro de agua realiza directamente desde el canal o mediante una manguera flexible que se arrastra por el mismo equipo. El segundo caso, se necesita hidrantes a cada 200 o 300 metros, llevando la máquina una manguera de 115 o 165 metros. La pérdida de carga en la manguera hace que necesite más energía en estos montajes que en los de toma directa de un canal.

3.7 Ventaja de los sistemas de riego por aspersión.

La distribución del agua del terreno es bastante uniforme.

Puede ser utilizados en suelos con grandes velocidades de infiltración.

No erosiona ni destruye la estructura del suelo cuando hay buena dispersión.

Enriquece el agua de oxígeno durante la aplicación, favoreciendo a la planta.

Permite un gran ahorro del agua, evitando pérdida por evaporación, filtración y desbordamiento en la conducción y distribución del agua con un sistema bien diseñado.

Apropiado para el riego en la agricultura de ladera, evitando la erosión de los suelos y pérdida de la capacidad productiva de los mismos.

Es de fácil operación, siendo operado por personas capacitadas.

Realiza aumento en los rendimientos productivos de los cultivos.

3.8 Desventajas del riego por aspersión.

Disminución de la eficiencia de aplicación en las parcelas cuando existe vientos con velocidad superior a los 2.5 m/s.

Requiere de alto consumo de energía.

Altos costos de implementación.

Requiere de agua limpia y libre de elementos extraños que puedan perjudicar los accesorios y equipos que forman el sistema de riego.

Mala distribución del riego en zonas con fuertes vientos y cuando hay un mal diseño y programación del riego.

La vida útil del sistema se necesita de un correcto uso y mantenimiento de todos los componentes del sistema por un personal capacitado.

3.9 Aspersores

En los aspersores de impacto, la rotación es causada por el impacto de los chorros del agua en un brazo oscilante controlado por un resorte. Cuando el aspersor está en funcionamiento, el brazo oscilante interrumpe el chorro del agua y éste la tira para un lado. Una vez apartado del chorro, por la tensión del muelle, el brazo oscilante retorna e interrumpe, de nuevo, el chorro de agua. En el movimiento de retorno, el brazo oscilante golpea un lado del aspersor provocándole una rotación lenta. El aspersor puede regar, sólo, un sector circular cuando dispone de mecanismos que obliguen a que el sentido del movimiento se invierta, una vez ha

recorrido el correspondiente ángulo, como se describe más adelante, para los cañones. Es importante que el aspersor gire en la horizontal y la velocidad sea constante para que no queden áreas sin regar.

3.9.1 Los elementos de aplicación del agua en aspersión son emisores de varios tipos:

Aspersor de brazo oscilante (normalmente usados en coberturas).

Cuerpo del aspersor (bronce, plástico).

Orificios para roscar o insertar boquillas (de latón roscada y de plástico tipo bayoneta).

Se puede instalar una o dos boquillas, la principal y la cercana, de latón o plástico, (Faci, 2013).

3.9.2 Aspersor de turbina.

Se usa principalmente en jardinería.

Difusores (normalmente usados en pivotes).

De plato fijo y giratorio.

3.9.3 Factores que afectan la eficiencia en riego por aspersión.

La eficiencia de aplicación del método de riego por aspersión es afectada por varios factores, entre los cuales, la presión de trabajo de los aspersores. A bajas presiones el agua es fragmentada en gotas de gran tamaño y la proveniente de la boquilla cae en forma de anillo a cierta distancia del aspersor, obteniéndose una distribución deficiente.

A presiones muy altas, el fragmento de la gota muy fina, cae alrededor del aspersor. En estas condiciones, el patrón de humedecimiento puede tomar muchas formas debido al factor viento y turbulencias. Cuando el aspersor trabaja con una presión adecuada, produce un patrón de humedecimiento normal.

Autor: Rain Bird



Figura 3. Aspersor de impacto Rain Bird.

3.9.4 Características del aspersor.

Rain Bird P5-R Plus - Aspersor de Impacto de plástico con Boquilla, patrón Ajustable de 0° a 360°, Distancia de pulverización de 25' a 45' (7.3- 13.4 m) y conexión de ½”.

Cuadro 1. Datos de manufactura del aspersor.

Marca	Rain Bird modelo P5-R
Color	Verde / Negro
Material	plástico
Estilo	Aspersor de impacto de plástico con juego de Boquillas 06,08,10 y 12 (roja, verde, azul amarilla y blanca).
Dimensión de artículo	42 x 23 x 340 mm
Tamaño de la boquilla	# 08 color azul (3.6 mm)

El tornillo difusor crea gotas de agua más pequeñas para una cobertura más uniforme.

El brazo guía de pulverización PJ de latón con peso de ahorro de agua controla el flujo, evita salpicaduras laterales en edificios y pasarelas.

Boquilla de bayoneta extraíble para una fácil limpieza; Diseño de aspersor de flujo recto para un rendimiento superior en condiciones de agua sucia; Cobertura de círculo completo (360°) o círculo parcial (20° a 340°) con ajuste de patrón infinito. Boquilla de plástico maxi-paw.

Cuadro 2. Datos de desempeño del aspersor P5-R.

Presión	Radio	Flow
PSI	Feet	GPM
25	35	2.8
35	38	3.3
45	40	3.7
55	41	4.1

Rain Bird corporación 2016, Consumer Products Division.

3.10 Clasificación de los aspersores de acuerdo a la presión de trabajo

- De baja presión: < 2,5 Kg/cm² o 250 kPa.

Diámetro <4 mm; Descarga >1000 L/h; Marco <12-15 m; 1 boquilla.

- De media presión: 2,5 a 4 Kg/cm².

Diámetro de 4 a 6 mm; Descarga de 1000 a 5000 L/h; Marco de 15 a 24 m; 1 o 2 boquillas.

- De alta presión: >4 Kg/cm² (cañones).

Diámetro > 8 mm; Descarga de 6-40 m³/h; Alcance de 25 a 60m; 1 o 2 boquillas; en general dan baja uniformidad y son muy afectados por el viento.

3.11 Adaptabilidad del riego por aspersión

Pereira (2010), define que el riego por aspersión es apropiado para la mayoría de los cultivos y se adapta a casi todos los suelos regables porque los aspersores tienen una

gama amplia de características y de capacidades. Con los aspersores a los espaciamientos apropiados, en los sistemas estacionarios, el agua puede ser aplicada con cualquier pluviometría, desde un mínimo de 3 mmh-1, lo que permite el uso de la aspersión en los suelos de textura fina y con una baja tasa de infiltración.

Los sistemas estacionarios se adecuan tanto a riegos frecuentes, diarios o casi diarios, en el caso de suelo con muy baja capacidad de retención y cultivos con raíces poco profundas, como a riegos con grandes dosis y baja frecuencia. Los sistemas de laterales móviles se adaptan particularmente a riegos de alta frecuencia, pero, cuando la infiltración y la permeabilidad del suelo es baja, provoca escorrentía superficial.

3.12 Coeficiente de uniformidad de riego por aspersión

Tovar (2017), menciona que la uniformidad es un factor que se asocia en la calidad del riego y relaciona la variabilidad de descarga de los emisores, es decir la lámina de riego en toda el área. Es una magnitud que caracteriza a todos los sistemas de riego y que desde luego intervienen en su diseño, tanto en el agronómico, por lo que afecta al cálculo de las necesidades totales de agua como en el hidráulico, puesta que es una función que se define en los límites entre los que se permite que se varíen los caudales de los emisores.

Medida de uniformidad: este método se originó en el servicio del %DU conservación de los suelos del departamento de agricultura en los Estados Unidos de América (USDA). Consiste en comparar la lámina promedio de agua que cae en 25% de los recipientes que perciben la menor cantidad de lámina almacenada, con la lámina promedio almacenada del 100% del área. El valor mínimo de DU para una uniformidad aceptable del 79% (Burtz y Styles 2000).

Flores-Tuta et al., (2013), hacen mención sobre el sector agrícola que realiza el mayor consumo de agua en el mundo y por tanto la agricultura irrigada debe ser eficiente para tener sostenibilidad ambiental y económica. Un parámetro principal para evaluar sistemas de riego es la uniformidad de aplicación de agua en la superficie del área irrigada, reflejándose directamente en el manejo y desempeño del cultivo, en la calidad y cantidad de los productos, en la eficiencia del uso del agua, en el costo del riego y por tanto de la producción (Bernardo et al., 2009).

(Solomon y Seginer et al., 1983, 1991a), según Laserna, Montero, Sheikhesmaeili y Alcázar Bascuñana, mencionan que la uniformidad de distribución del agua es un indicador de las variaciones especiales aplicadas sobre la superficie de regadío. Se ha demostrado que cuando hay un aumento de la uniformidad en la aplicación del agua en el campo, puede favorecer la eficiencia de riego mediante la reducción de la percolación profunda y la escorrentía superficial causada por un exceso de riego. Por lo tanto, las evaluaciones de campo son un excelente procedimiento para investigar los factores que afectan la uniformidad del riego real bajo múltiples combinaciones de condiciones climáticas e hidráulicas en los sistemas de riego por aspersión. Por otra parte, una mala distribución de agua podría dejar partes de la cosecha en una situación deficitaria de agua, sino que también podría exceder el riego en otras partes causando acumulaciones de agua, daños a las plantas, la salinización del suelo, y la lixiviación de fertilizantes químicos en las aguas subterráneas y el rendimiento del cultivo.

Otro de los factores decisivos del sistema para mejorar la uniformidad de distribución de agua es el grado de traslape de los aspersores. Los sistemas de riego por aspersión requieren un traslape adecuado entre aspersores para obtener una buena uniformidad de distribución (Keller y Bliesner, 1990). Phocaides (2007), recomienda que, con el fin de obtener una buena uniformidad por espaciamiento entre aspersores, esta no debería exceder el 65% del diámetro mojado en condiciones de viento bajas a moderadas, para marcos cuadrados y rectangulares. También afirmó que, en condiciones de viento fuertes, la separación entre aspersores debería ser del 50% del diámetro mojado con la dirección lateral perpendicular a la dirección del viento.

3.13 Criterio de uniformidad de Christiansen

Christiansen (1942), considera un coeficiente de uniformidad aceptable a valores por encima del 80% resultado que refleja una correcta aplicación y distribución del agua en el área bajo riego, permitiendo un uso más eficiente del agua disponible maximizando la producción debido a que los cultivos reciben la misma cantidad de agua de acuerdo a sus necesidades hídricas.

$$CUC = 100 * \left[1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{|xi-M|}{M*n} \right) \right]$$

x_i = medida de cada pluviómetro

M = valor medio del agua recolectada en todos los pluviómetros

n = número de pluviómetros

3.13.1 Criterio de uniformidad de Wilcox

García y Briones (2015), hacen mención sobre un ajuste de la ecuación de Christiansen propuesta por Wilcox y Swailes (1947), con valor de CUW superior al 75% del valor aceptable a su criterio, por lo tanto, sugirieron otro coeficiente de uniformidad, en el cual $\left| \frac{y_i - \bar{Y}}{N} \right|$ reemplazaron el término, del UCC, con, S , que es la desviación estándar (la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones del valor promedio), resultando la siguiente ecuación.

$$UCW = 1 - \frac{S}{\bar{Y}}$$

Interempresa (2010), hace mención sobre el efecto de la dirección del viento sobre la uniformidad de riego, cuando se trata de marcos rectangulares, es otro de los puntos donde suele haber más discrepancias. Así, mientras la recomendación clásica es colocar los marcos de forma que el viento sople en la dirección del mayor espaciamiento, hay situaciones en que se consiguen mayores valores de CU cuando el viento sopla paralelo al menor espaciamiento, dependiendo de la forma del modelo de reparto de agua que tenga el aspersor.

La velocidad del viento se incrementa con la altura según una función logarítmica, por lo que, en el diseño de los sistemas, el aspersor se suele colocar lo más bajo posible, según la altura de los cultivos a regar. Esta es otra razón por la que el ángulo de descarga de la mayor parte de los aspersores agrícolas es de 23° a 27°, en lugar de los 32° que sería el que consigue máximo alcance en condiciones sin viento. Sin embargo, experiencias con aspersores en riego en bloque ofrecen una mayor uniformidad de riego situando el aspersor a 2 metros del suelo, frente a una altura de 0,65 metros, debido a que a una mayor altura se producen curvas radiales con un mayor alcance mojado.

T. Stambouli, Nery Zapata, E. Playán² y J. M. Faci (2014), hacen referencia que el viento es el meteoro que más afecta a los valores de CUC y PEA. Faci y Bercero (1991),

encontraron que para distintas coberturas fijas de aspersión en el experimento que realizaron en el Valle del Ebro el valor de CUC disminuía cuando la velocidad del viento era mayor de 2 m/s (7.2 km/h). Playán y col. (2006), mencionan que la velocidad del viento afectaba en menor medida el CUC en los pivots que en las coberturas fijas de aspersión.

Rain Bird (2010), define que la uniformidad de la Distribución (UD) es una medida de cuán equitativamente o pareja es aplicada el agua a través del campo durante el riego. Por ejemplo, si se aplican 2.50 cm de lámina de agua en una parte del campo, pero sólo 1.25 cm de lámina en otra parte del campo, la UD es deficiente. UD se expresa en porcentaje entre 0 y 100%, pero en la práctica es virtualmente imposible obtener el 100%. Una UD inferior al 70% es considerada deficiente, UD entre 70 y 90% es buena, y UD superior al 90% es excelente. En resumen, una UD deficiente significa que se está aplicando demasiada agua, lo que implica un gasto innecesario, o que el agua aplicada no es suficiente, causando estrés a los cultivos.

Cuadro 3. Valores de CU de Rain Bird.

Porcentaje de UD de Rain Bird		
Inferior a	70%	Deficiente
mayor o igual	70 - 90 %	bueno
Superior a	90%	excelente

3.14 Marco o disposición conjunta de los aspersores

Tarjuelo (2005), determina que las interacciones o solapes entre los modelos de distribución de agua de los aspersores continuos para lograr una buena uniformidad de reparto de agua.

Los marcos normalmente adaptados como separación entre aspersores dentro del ramal y entre ramales suelen ser: 12 x 12, 12 x 15, 12 x 18, 15 x 15 y 18 x 18 m en rectángulo y 18 x 15 m en triángulos. En general son múltiplos de 6 metros para sistemas con tuberías en superficie, y pueden tomar cualquier valor si se trata de tuberías enterradas.

El espaciamiento entre los aspersores es uno de los aspectos fundamentales en el diseño del sistema. Heerman y Kohl (1980), según Tarjuelo (2005) se recomiendan separaciones del 60% del diámetro efectivo del aspersor para marcos en cuadrados o en triángulos y el 40% y 75% para marcos en rectángulo, siempre que se trate de vientos menores de 2 m/s. este espaciamiento debe reducirse al aumentar la velocidad del viento según los siguientes valores orientativos.

Cuadro 4.Efecto de reducción del viento.

% de reducción	Velocidad viento (m/s)
10-12	4-6
18-20	8-9
25-30	10-11

En los datos anteriores, se entiende por diámetro efectivo el 95 % del diámetro mojado para aspersores con dos boquillas, y el 90 % de este para aspersores con una boquilla.

3.15 Distribución del agua sobre el suelo.

La “lluvia” emitida por cada aspersor deben distribuirse de forma que el impacto de las gotas y la intensidad de lluvia no perjudiquen las condiciones físicas del cultivo o del suelo, logrando la máxima uniformidad posible.

Xin, Haijun, Yan, Zhang y Chen (2020), definen que cuando no hay viento presente, las curvas de distribución de agua en un terreno plano se aproximan a un conjunto de círculos concéntricos centrados en la ubicación del rociador, y las tasas de aplicación de agua a la misma distancia del rociador son casi iguales. Sin embargo, cuando el rociador se usa en terrenos inclinados, los patrones de distribución de agua se aproximan a un conjunto de círculos excéntricos, y a la misma distancia del rociador, la tasa de aplicación de agua para cuesta arriba es mayor que la de cuesta abajo, lo que resulta en una baja uniformidad de aplicación de agua.

Martínez P.J. (2021), define que la uniformidad de un sistema de riego es uno de los aspectos más condicionantes de su eficiencia. Aporta información sobre la forma en que se produce el reparto de agua en los cultivos. Cuando el coeficiente de uniformidad

del riego es bajo, las descargas de agua son heterogéneas dentro de una misma parcela, por tanto, aparecen zonas que reciben menos cantidad que otras. Esta situación, debe compensarse aumentando los tiempos de los riegos, esto con el objetivo de que el conjunto de plantas, reciban como mínimo un volumen de riego que permita satisfacer su demanda hídrica. Cuando la pérdida de uniformidad llega a ser extrema, la atención de esta demanda puede presentar la aparición de zonas excesivamente regadas. Por tanto, un sistema de riego con baja uniformidad exigirá un mayor consumo de agua y aumento en las pérdidas de productividad de los cultivos.

Una baja uniformidad del sistema de riego supone un incremento del consumo de agua, costes y pérdidas de producción.

El agua de riego es un medio de transporte que permite el suministro de fertilizantes al cultivo, por lo que también puede ir ligada a un no dispensable incremento en los costes de producción. De igual forma para lograr una correcta uniformidad de un sistema de riego, es esencial llevar a cabo una planificación previa a su instalación.

Para evaluar el grado de uniformidad de un sistema de riego es necesario llevar a cabo una prueba de descarga de emisores y presiones en puntos concretos en la parcela regada.

3.16 Causas de baja uniformidad

Los sistemas que funcionan durante más de un año con uniformidades en los rangos de excelente y bueno poseen prácticas de mantenimiento satisfactorio, no obstante, uniformidades pobres o <70% generalmente indica emisores obstruidos, deterioro de redes, o problemas con la regulación de la presión, y el arrastre ocasionada por el viento.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Materiales y equipos requeridos.

Autor: Google Eart

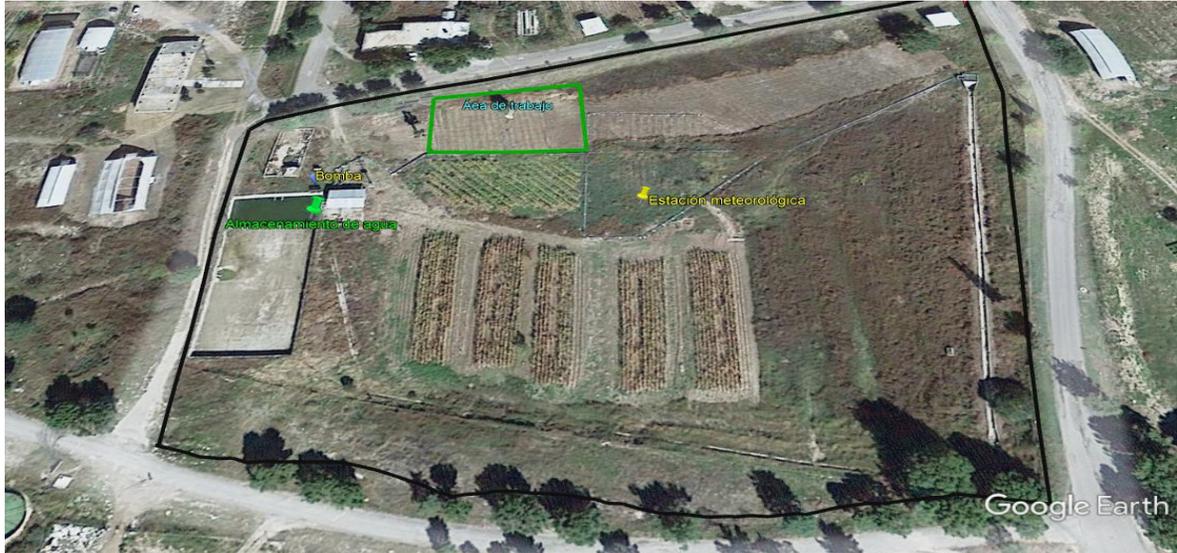


Figura 4. Localización geográfica del jardín hidráulico (Google Eart)

El área experimental se ubicó en el jardín hidráulico de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro sede Saltillo, Coahuila.

El suministro de agua se proporcionaba mediante una pila que estaba a 50 metros de distancia. Se utilizó una válvula de paso y un manómetro a lado del aspersor. El caudal del aspersor se aforo directamente, con un cronómetro y un recipiente de volumen conocido se puede determinar el volumen de agua captado, dirigiendo el chorro de agua arrojado por la boquilla hacia los recipientes y tomando el tiempo de llenado.

autor: Google Eart.



Figura 5. Localización del suministro de agua.

Se trabajaron con cuatro aspersores de la misma marca, de impacto, de una sola boquilla que son ampliamente utilizados en diferentes regiones. Los aspersores utilizados fueron de la marca Rain Bird P5-R de plástico con boquilla color azul. El aspersor se trabajó con medio giro (180°) durante las pruebas. Los datos de este aspersor se proporcionan en el capítulo de Revisión de Literatura.

La altura del aspersor se midió a un metro de la superficie. Para determinar la velocidad de rotación del aspersor se utilizó un cronómetro. Para la velocidad del viento se obtuvieron mediante la ayuda de una estación meteorológica ubicada en el jardín hidráulico de la UAAAN.

Autor: DR. Alejandro Zermeño G.



Figura 6. Estación meteorológica.

En la prueba, para recoger el agua de la boquilla de los rociadores, se utilizaron 40 recipientes de plástico con una altura de 7.5 cm y un diámetro de 11.2 cm.

Autor: Propio.



Figura 7. Armado de estacas porta vasos

El acoplamiento del aspersor se fijó, en medio de un campo rectangular de 12 x 12 m y 9 x 9 m. una cuadrícula de 3 m de separación en cada recipiente de captura que se ubicó dentro del espacio mencionado anteriormente. Las evaluaciones se realizaron en suelo sin malezas.

4.2 Prueba de Pluviometría.

Durante la prueba, se controló la presión de operación de la bomba y el caudal. Se mantuvo trabajando la boquilla a medio giro (180°) durante una hora. La velocidad y dirección del viento se registró a cada 30 minutos a una altura de 1.5 metros, mediante una estación meteorológica. Al final de la prueba, la cantidad de agua acumulada en cada recipiente de plástico se midió con una probeta con capacidad de 100 ml. Este procedimiento en el experimento se repitió para toda la prueba con sus respectivos intervalos de tiempo.

Los datos obtenidos se ingresaron en Excel, para determinar los parámetros de distribución de cada aspersor y los resultados se evaluaron para determinar los coeficientes de uniformidad de cada espaciado.

Generalmente las pruebas de pluviometría para evaluar la uniformidad de distribución consisten en coleccionar las precipitaciones en envases (o pluviómetros) que se colocan en campo en un arreglo cuadrulado a 3 x 3 m de espacio entre puntos de la cuadrícula.

Autor: Propio.

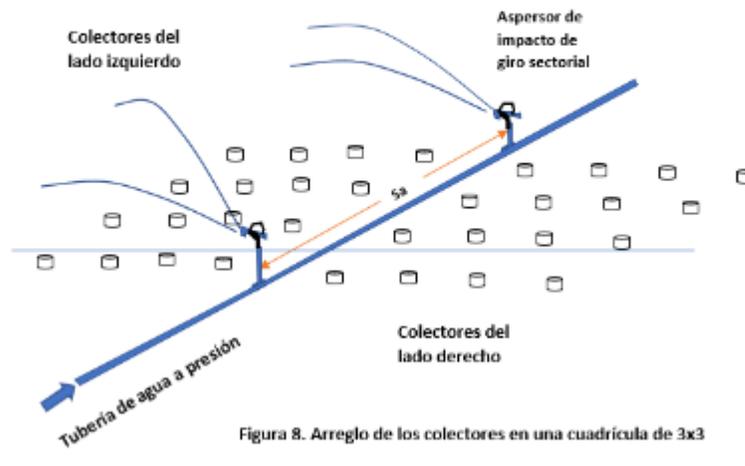


Figura 8. Arreglo de los colectores en una cuadrícula de 3 x 3 m.

El propósito de la prueba de pluviometría es mapear la distribución de la pluviometría general, para los aspersores en plena operación bajo condición de campo y conocer la distribución de la lluvia artificial dentro del área de contribución.

En laterales estacionarios de movimiento periódico manual o mecánico y también en aspersores fijos de instalación permanente, los botes colectores son colocados a la derecha y a la izquierda de la línea regante extendiendo el arreglo cuadrulado un poco más allá del alcance de los aspersores. En la prueba de pluviometría se miden los volúmenes de agua que caen en los envases colectores por un tiempo por al menos una hora, anotando las lecturas en un formato en concordancia con la disposición de los puntos de observación en campo, se trazan las hileras y las columnas de datos

reproduciendo el arreglo dentro del área de prueba, indicando la posición de la línea regante y un registro adicional de la dirección y velocidad del viento.

La prueba se complementa con el aforo de los aspersores, medición de la presión y apreciación del alcance del chorro en ambas direcciones a favor y en contra de la dirección del viento. El mecanismo de impacto de los aspersores se debe inmovilizar durante la instalación de los colectores y dirigir los chorros fuera del área de captación para prevenir que algunos botes colecten lluvia antes que otra, la hora de inicio de la prueba de pluviometría se anota al momento de soltar los aspersores y ajustar su giro sectorial a la presión señalado en el manómetro. Al terminar la prueba se repite el aforo, la medición de presión, la evaluación ocurrida y se mide los volúmenes precipitados.

Para saber cuántos recipientes era necesario calcular para obtener un muestreo representativo del patrón de aspersión se midió previamente la separación entre los aspersores y se estima el área de mojado, por ejemplo si los aspersores están espaciados a cada 12 m sobre la línea regante y el diámetro de mojado de los aspersores de prueba es 21 m, entonces el arreglo cuadrulado debe tener : 4 hileras por 8 filas de colectores espaciados a cada 3 m, y serian agregadas una fila hacia la derecha y una a la izquierda extendiendo la cuadrícula para tener la oportunidad de captar la pluviometría arrastrada por el viento en 40 colectores.

Los siguientes materiales fueron necesarios para realizar la prueba de pluviometría.

- Manómetro de Bourdon.
- Cronómetro o reloj segundero fácilmente legible.
- 40 recipientes colectores de ½ litro (pluviómetros) en forma cilíndrica.
- Probeta graduada de 100 ml para colectar y medir el volumen del agua de los pluviómetros.
- Cinta métrica mayor a 10 m para la medición entre las separaciones de colectores
- 40 estacas de madera con una altura de 50 cm cada una.
- Clavos de una pulgada para adherir unos colectores a las estacas.

- Una barra de metal que sirve cuando el suelo donde se entierra la estaca este muy compactada.
- Un mazo o martillo para golpear la estaca al momento de colocarlos.
- Formato para la recolección de datos durante la prueba.
- Estación meteorológica para la toma de datos de velocidad de viento.
- Equipo de cómputo para el proceso de datos e investigaciones y formato para registro de datos.

Cuadro 5. Datos climáticos registrados durante la prueba.

Prueba 1, 2	Taire	Lluvia	Tsuelo	Viento	HR
25/05/2022	°C	mm	°C	m/s	%
11:00 a. m.	23.07	0	20	2.397	50.01
11:30 a. m.	23.93	0	20.54	2.64	45.15
12:00 p. m.	24.84	0	21.1	2.4	43.08
12:30 p. m.	25.26	0	21.64	2.59	42.95
01:00 p. m.	25.59	0	22.15	2.95	44.73
26/005/2022	°C	mm	°C	m/s	%
09:00 a. m.	22.53	0	18.28	1.497	47.2
09:30 a. m.	23.53	0	18.65	2.178	41.7
10:00 a. m.	24.94	0	19.09	1.937	32.82
10:30 a. m.	26.1	0	19.56	2.157	30
11:00 a. m.	27.11	0	20.06	1.881	25.36

Los aspersores en el área de prueba se operaron a 25 PSI de presión, y el caudal de la boquilla fue de 2.8 GPM con un alcance de chorro 33 pies en promedio.

4.3 Metodología de análisis.

En campo se midió la pluviometría para dos espaciados entre aspersores (9 m y 12 m) y en gabinete se calcularon los patrones de pluviometría, simulando el traslape a cuatro posibles distancias entre líneas regantes (9 x 9 m, 9 x 12 m, 9 x 15 m, 9 x 18 m y 12 x 12 m, 12 x 15 m, 12 x 18 m y 12 x 21 m), el espacio entre laterales es un múltiplo del espaciado de los colectores.

Los volúmenes colectados por recipientes dentro del área de cobertura de los aspersores varia conforme la distancia de los aspersores aumenta, por lo mismo para obtener una distribución aceptable el patrón de pluviometría de los aspersores adyacentes fue

combinada para calcular la cantidad colectada al ensayar los traslapes. Al hacer la sumatoria de los volúmenes, los datos colectados de la derecha se suman a los datos de la izquierda y se verifica que la sumatoria del patrón ensayado en gabinete sea igual a la sumatoria de los volúmenes observados en la prueba de campo, para luego aplicar las funciones estadísticas requeridas para operacionalizar las variables de uniformidad como se puede apreciar en los cuadros anexos.

La relación entre la velocidad del viento y el coeficiente de uniformidad es tendencia lineal negativa, y al incrementarse la velocidad del viento se reduce el % CU.

El coeficiente de uniformidad de Wilcox se puede determinar aplicando las funciones estadísticas de Excel (promedio y desviación estándar) en la matriz de los volúmenes colectados de agua capturada, el CU de Christiansen se calculó la sumatoria de las desviaciones absolutas ($|X_i - M|$) como se indica en el método. En cada análisis de datos se verificaba revisando que las sumatorias para la matriz de precipitaciones observados en campo fuera igual a la sumatoria para la matriz de precipitaciones calculados en gabinete.

Los coeficientes de uniformidad calculados en base a los datos de campo se correlacionaron con las velocidades de viento para hacer la estimación lineal de la recta de regresión, y predecir la tendencia de los % CU esperados al operar los aspersores con velocidades del viento diferentes a los registrados durante la prueba, en otros estudios la evidencia empírica se ha demostrado que la relación entre la velocidad del viento y el coeficiente de uniformidad es lineal negativa, al incrementarse la velocidad del viento se reduce el % CU de Christiansen y también el % CU de Wilcox.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Evaluación de la uniformidad de distribución para cuatro aspersores de impacto a medio círculo probados al aire libre a diferentes espaciados.

El estudio del patrón de distribución del agua precipitada dentro del área de cobertura de los aspersores a diferentes espaciados, permitió caracterizar la uniformidad de la pluviometría asociada al traslape entre los aspersores; observando que el volumen promedio colectado y los coeficientes de uniformidad calculados disminuyen conforme se incrementa la distancia entre los aspersores.

La uniformidad de la pluviometría que se distribuye dentro del área de mojado por los aspersores, tiende a ser alta cuando dos o más colectores reciben la misma cantidad de agua, sin embargo en el análisis del patrón de aspersión se debe considerar que el aspersor rompe el chorro de agua en el aire dispersando un conjunto de gotas de diferente tamaño que se precipitan al suelo atraídas por la gravedad, las cuales pueden ser arrastrado por el viento, evaporarlas o desviarlas de su trayectoria ocasionando asimetría del patrón de distribución en campo al aire libre, y por lo mismo la distorsión principalmente ocasionada por el viento se pierde la uniformidad en la distribución.

5.2 Efecto de la velocidad del viento sobre la uniformidad de distribución dentro del patrón traslapado de aspersión.

En condiciones de viento se produce un desplazamiento de la distribución del agua en la dirección del viento, por eso el alcance del chorro arrojado por los aspersores es mayor en la dirección del viento y se reduce en la dirección opuesta. El coeficiente de uniformidad disminuye y mucha pluviometría se pierde al incrementarse la velocidad del viento, tal tendencia ha sido reportada por muchos autores (Cisneros-Zayas, et al 2019, Alejos 2018, Phocaidés 2007).

La prueba de pluviometría permitió comparar las precipitaciones entre sí y la (desviación estándar y absoluta) en comparación al promedio.

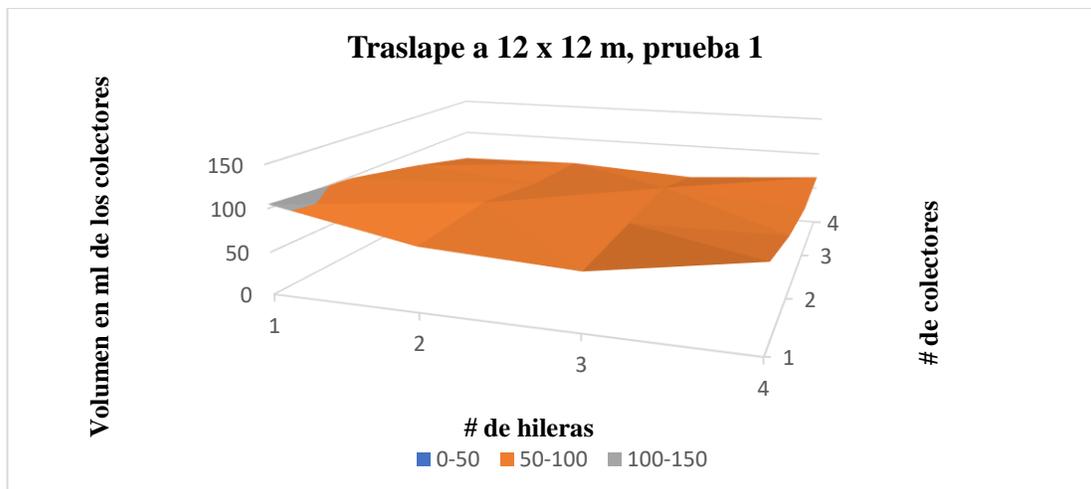


Figura 9. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 12 m con una velocidad del viento de 2.479 m/s.

En la figura 9, prueba 1 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 12 x 12 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 86.46 % con el método de Christiansen y un 80.09 % de uniformidad con el método de Wilcox.

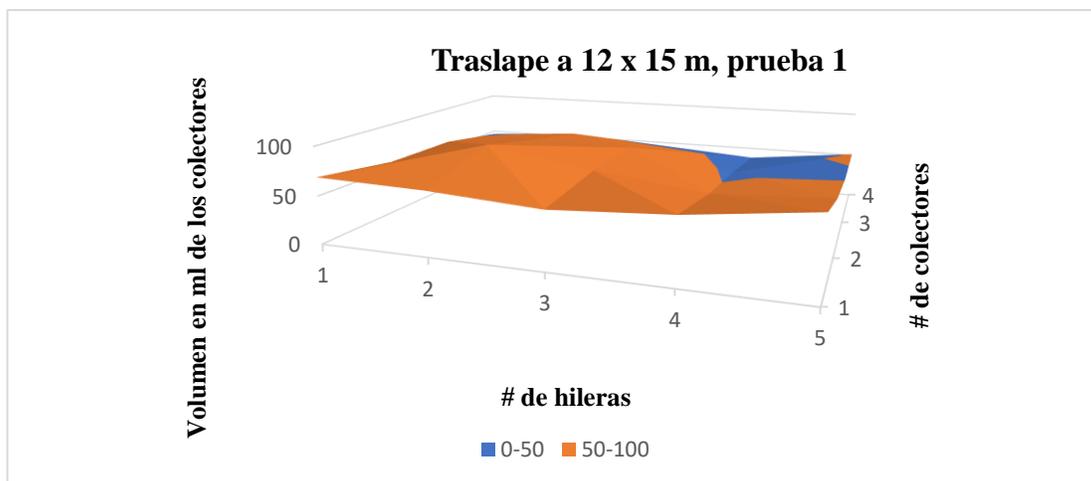


Figura 10. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 15 m con una velocidad del viento de 2.479 m/s.

En la figura 10, prueba 1 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 12 x 15 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 84.36 % con el método de Christiansen y un 79.94 % de uniformidad con el método de Wilcox.

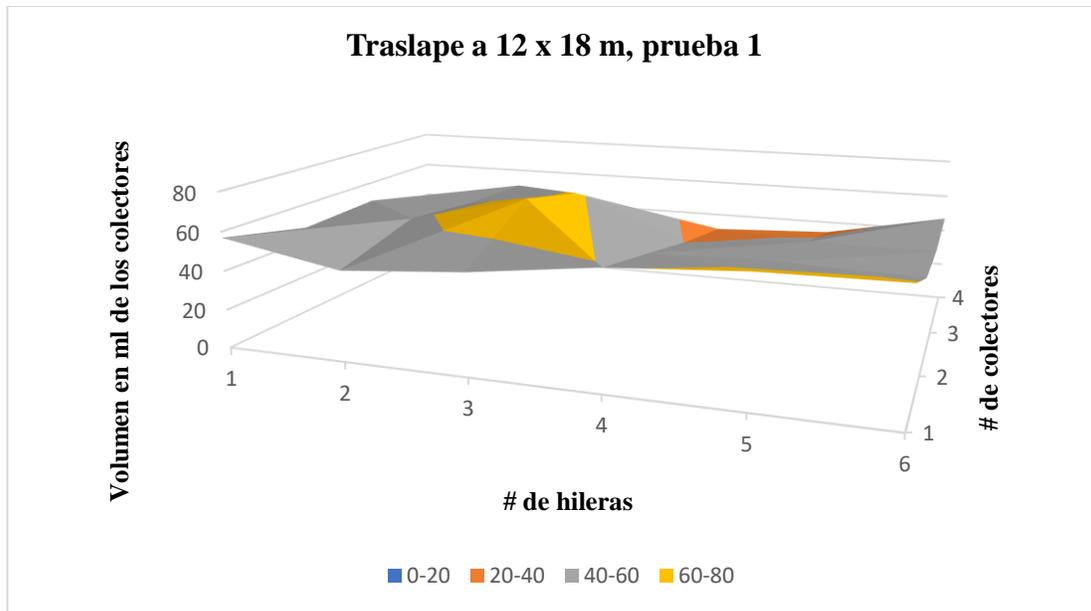


Figura 11. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 18 m con una velocidad del viento de 2.479 m/s.

En la figura 11, prueba 1 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 12 x 18 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 84.79 % con el método de Christiansen y un 79.8 % de uniformidad con el método de Wilcox.

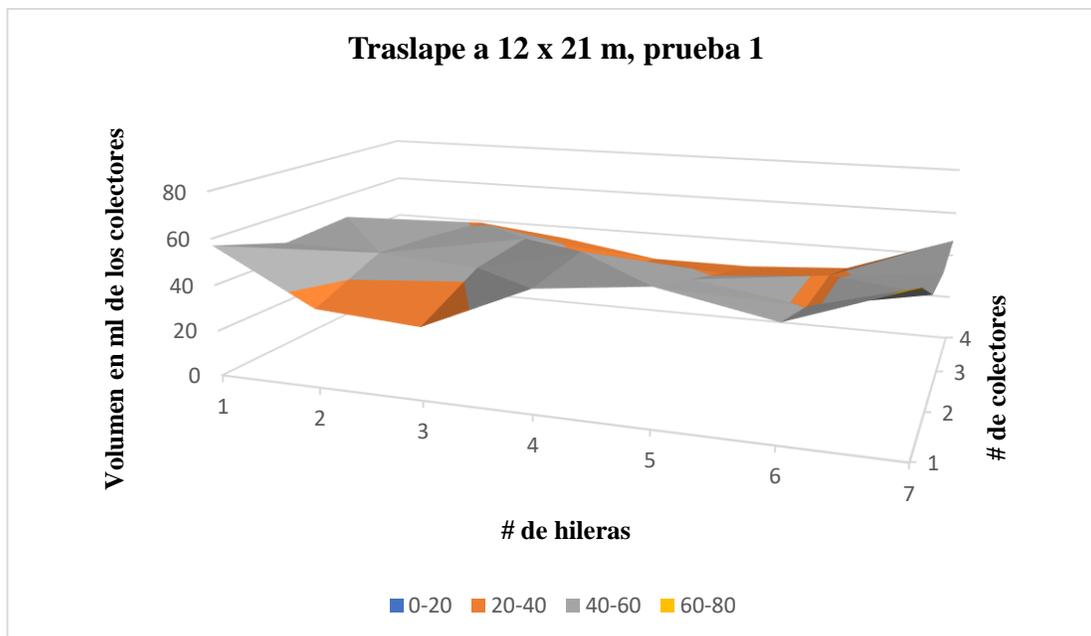


Figura 12. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 18 m con una velocidad del viento de 2.479 m/s.

En la figura 12, prueba 1 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 12 x 21 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 82.24 % con el método de Christiansen y un 78.1 % de uniformidad con el método de Wilcox.

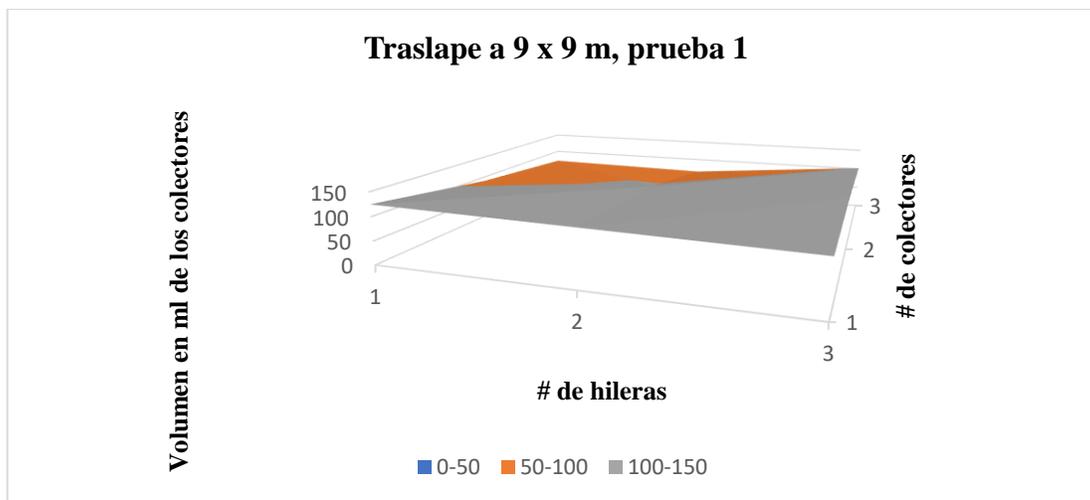


Figura 13. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 9 m con una velocidad del viento 2.647 m/s.

En la figura 13, prueba 1 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 9 x 9 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 83.39 % con el método de Christiansen y un 79.2 % de uniformidad con el método de Wilcox.

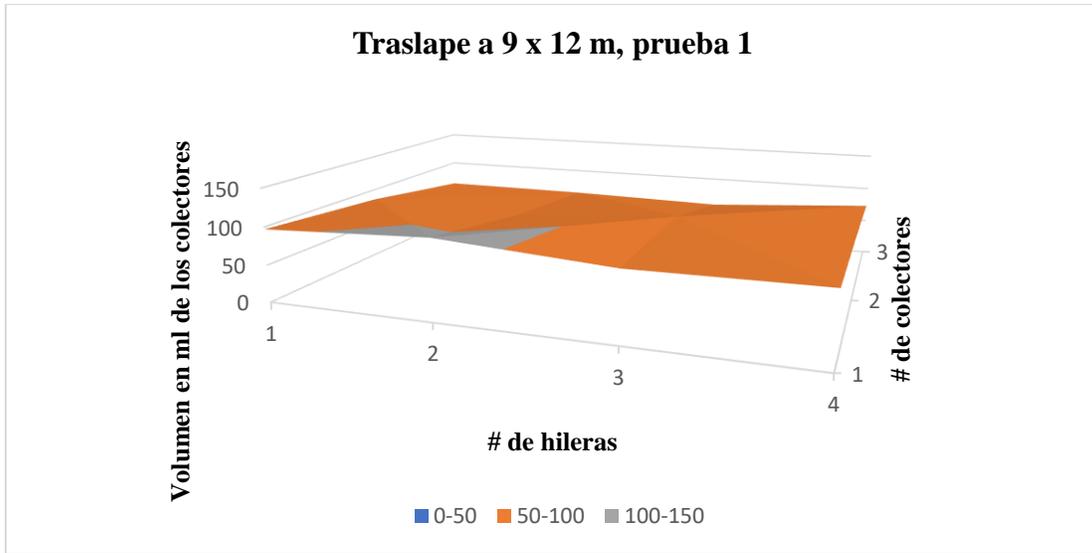


Figura 14. Distribución de la pluvimetría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 12 m con una velocidad del viento de 2.647 m/s.

En la figura 14, prueba 1 se muestra la distribución de la pluvimetría en el patrón traslapado a 9 x 12 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 84.48 % con el método de Christiansen y un 81.27 % de uniformidad con el método de Wilcox.

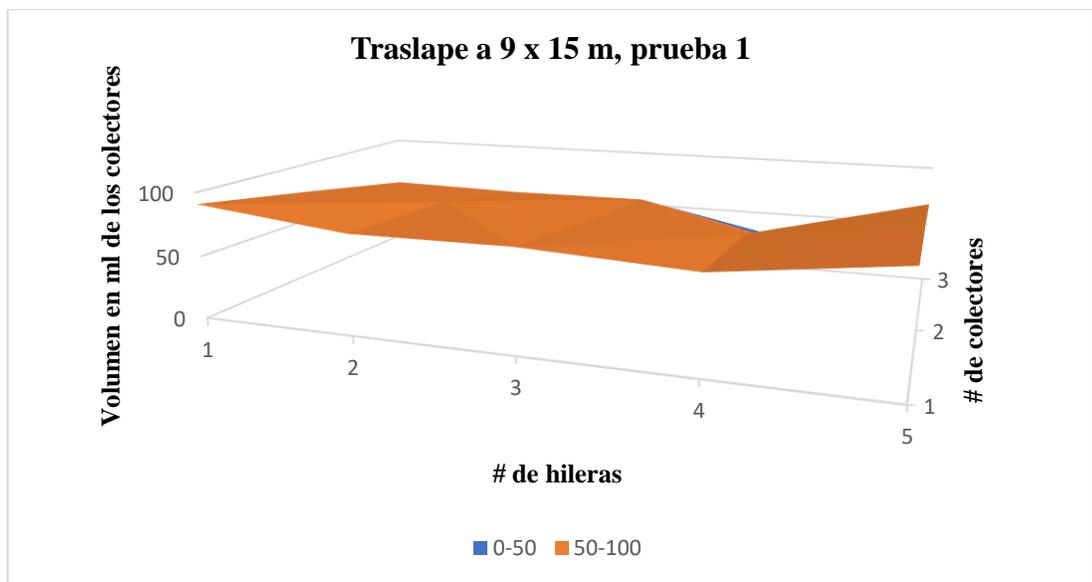


Figura 15. Distribución de la pluvimetría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 15 m con una velocidad del viento de 2.647 m/s.

En la figura 15, prueba 1 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 9 x 15 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 82.71 % con el método de Christiansen y un 76.95 % de uniformidad con el método de Wilcox.

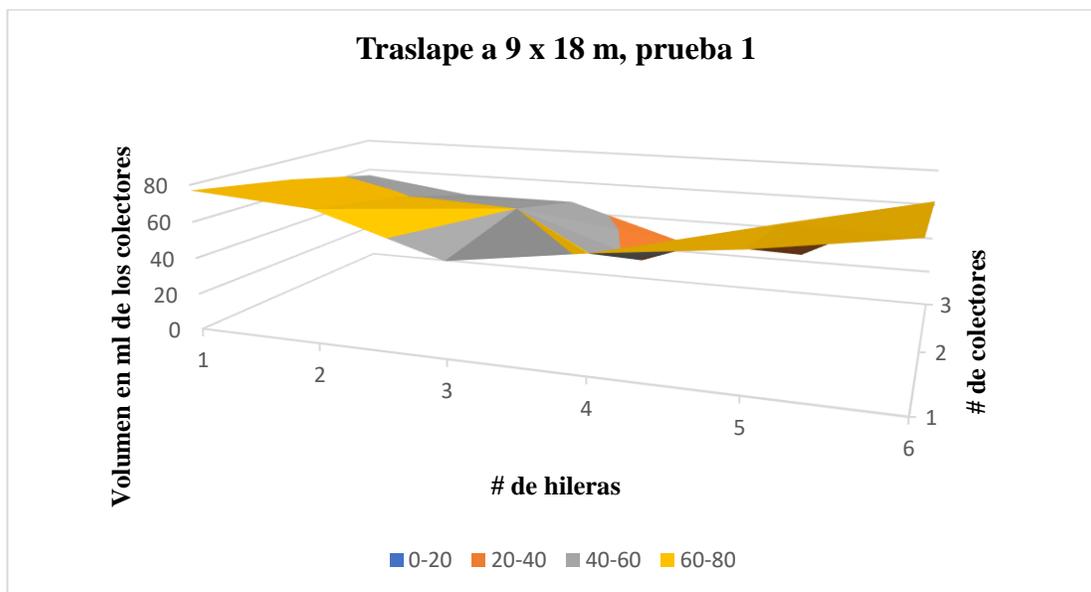


Figura 16. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 18 m con una velocidad del viento de 2.647 m/s.

En la figura 16, prueba 1 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 9 x 18 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 77.90 % con el método de Christiansen y un 71.78 % de uniformidad con el método de Wilcox.

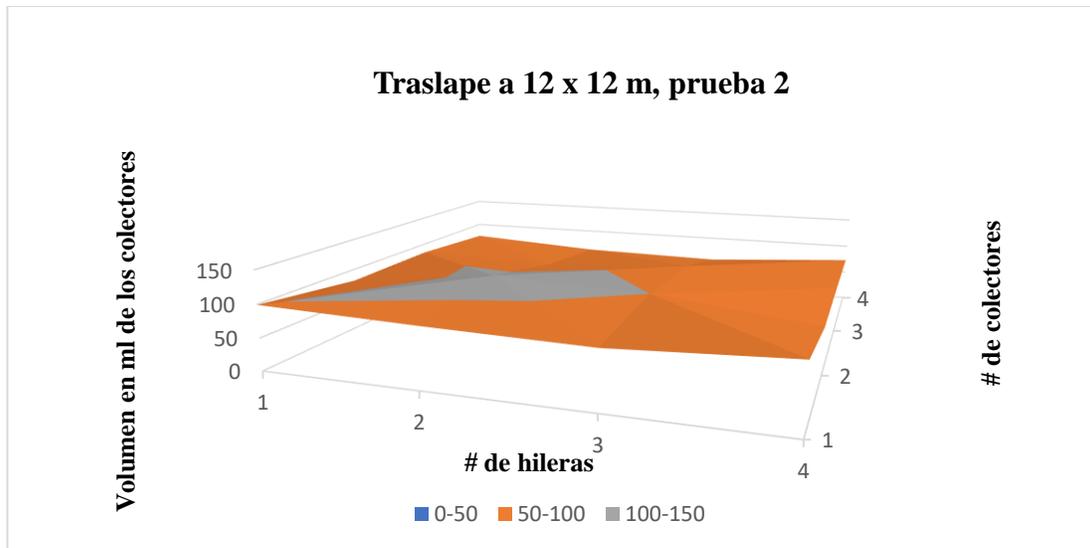


Figura 17. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 12 m con una velocidad del viento de 1.871 m/s.

En la figura 17, prueba 2 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 12 x 12 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 86.21 % con el método de Christiansen y un 82.95 % de uniformidad con el método de Wilcox.

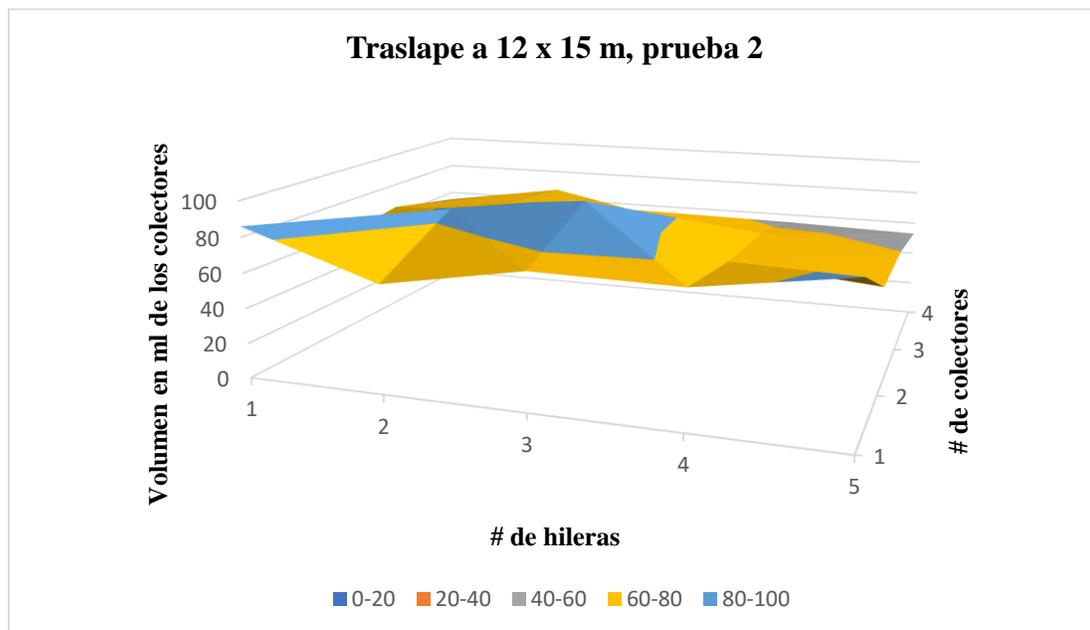


Figura 18. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 15 m con una velocidad del viento de 1.871 m/s.

En la figura 18, prueba 2 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 12 x 15 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 84.64 % con el método de Christiansen y un 80.96 % de uniformidad con el método de Wilcox.

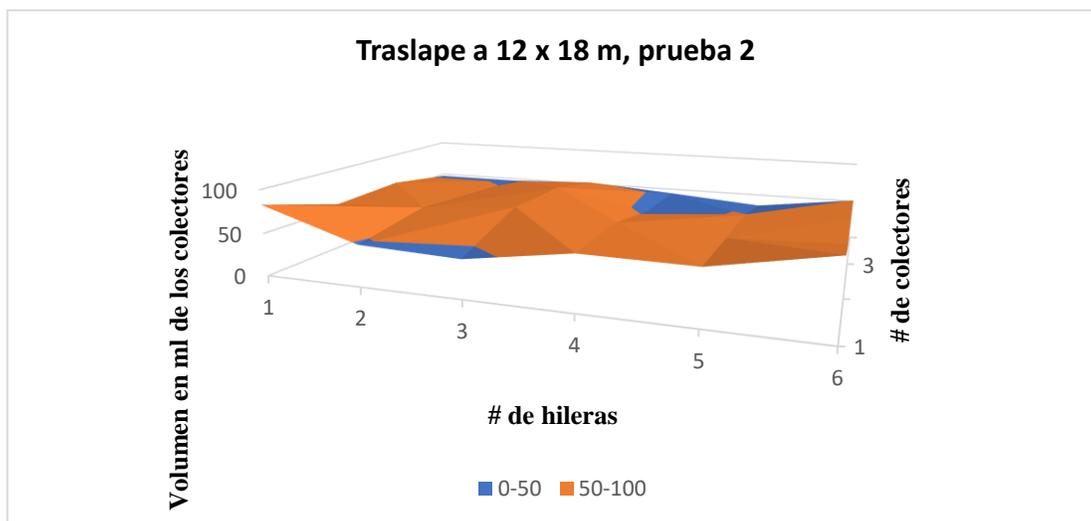


Figura 19. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 18 m con una velocidad del viento de 1.871 m/s.

En la figura 19, prueba 2 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 12 x 18 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 84.38 % con el método de Christiansen y un 79.26 % de uniformidad con el método de Wilcox.

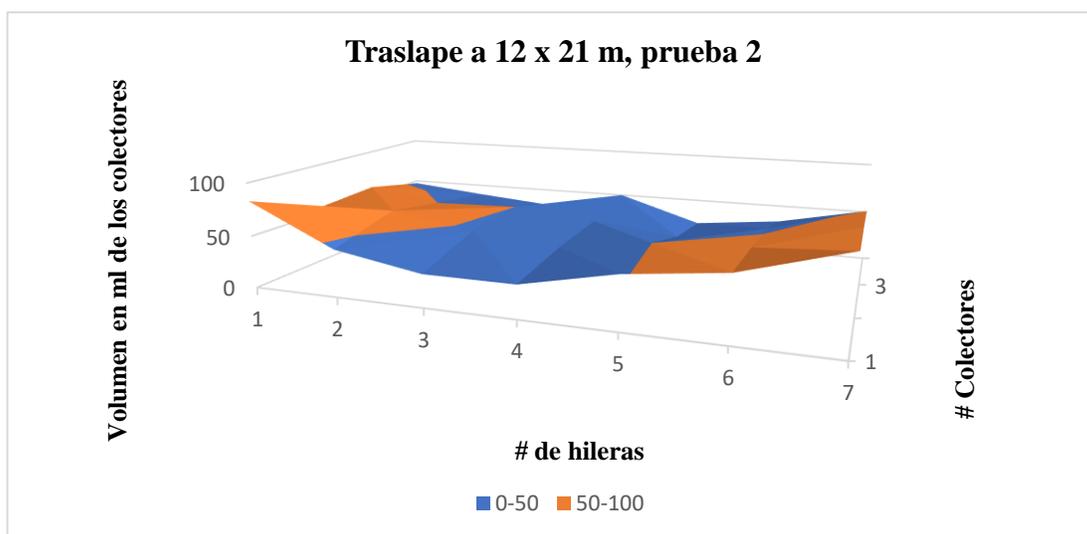


Figura 20. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 12 x 21 m con una velocidad del viento de 1.871 m/s.

En la figura 20, prueba 2 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 12 x 21 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 78.96 % con el método de Christiansen y un 70.92 % de uniformidad con el método de Wilcox.

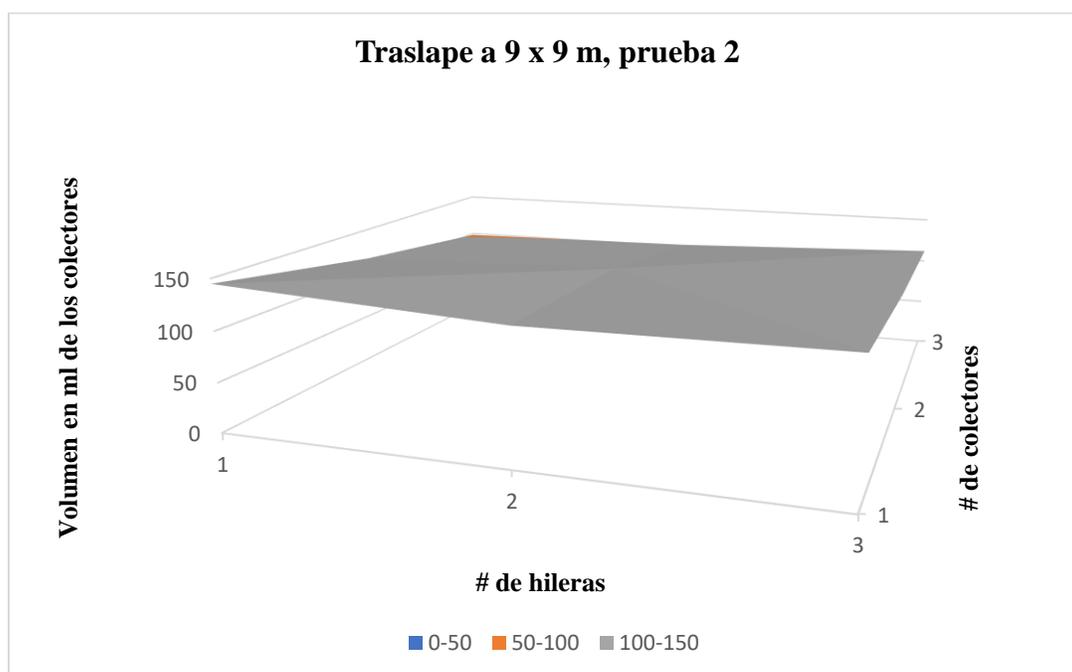


Figura 21. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 9 m con una velocidad del viento de 1.992 m/s.

En la figura 21, prueba 2 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 9 x 9 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 90.19 % con el método de Christiansen y un 87.49 % de uniformidad con el método de Wilcox.

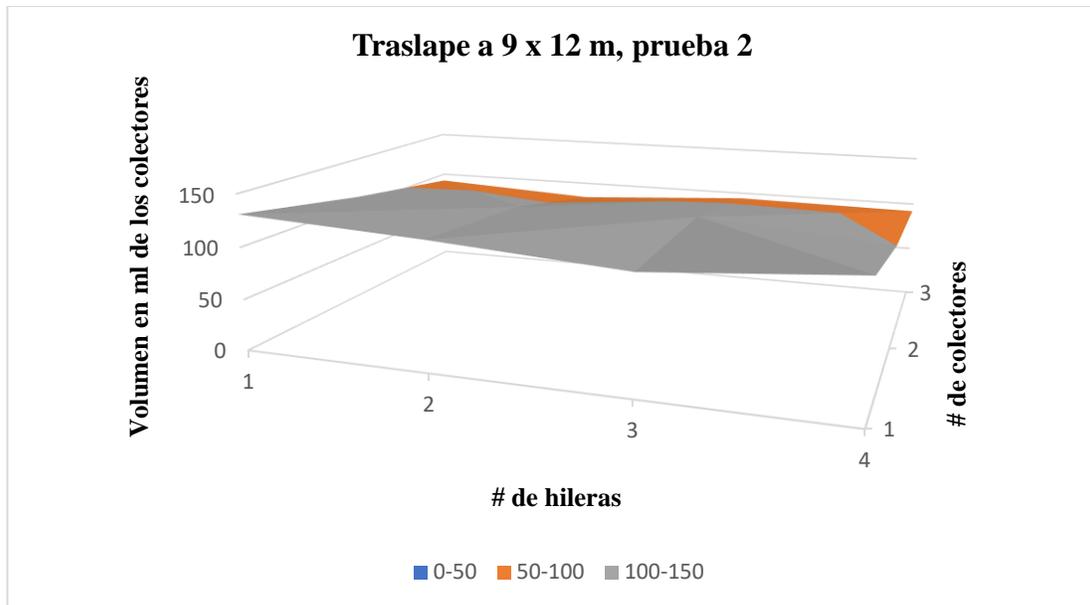


Figura 22. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 12 m con una velocidad del viento de 1.992 m/s.

En la figura 22, prueba 2 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 9 x 12 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 88.59 % con el método de Christiansen y un 86.14 % de uniformidad con el método de Wilcox.

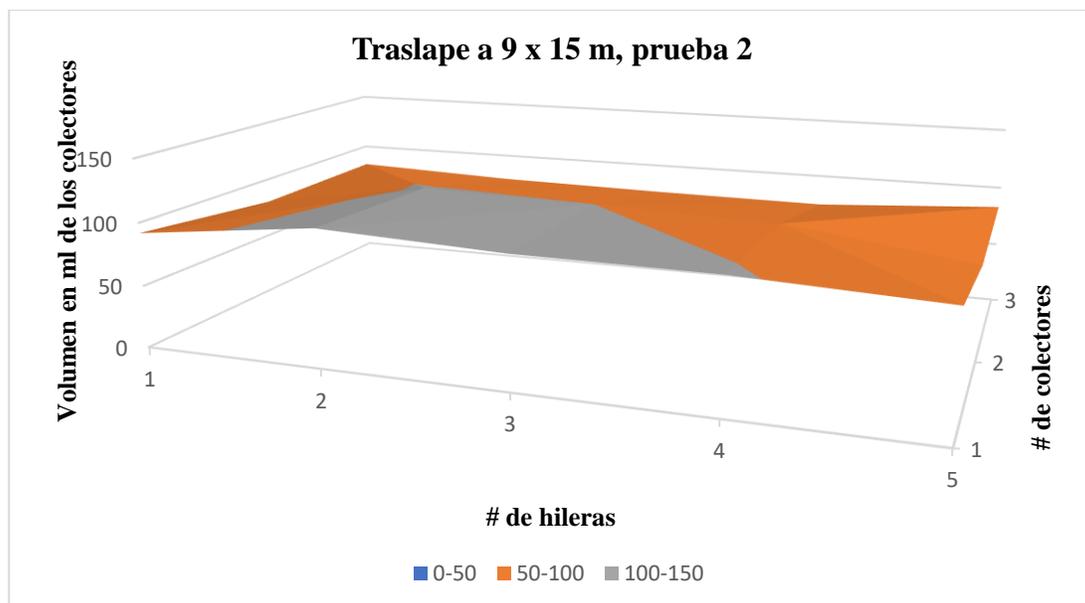


Figura 23. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 15 m con una velocidad del viento de 1.992 m/s.

En la figura 23, prueba 2 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 9 x 15 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 88.07 % con el método de Christiansen y un 86.73 % de uniformidad con el método de Wilcox.

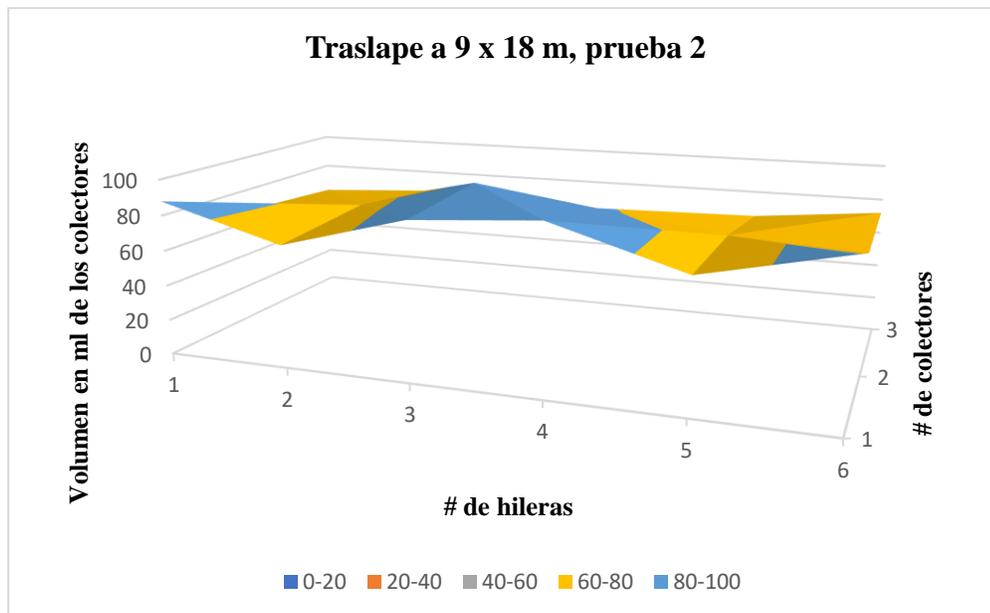


Figura 24. Distribución de la pluviometría dentro del patrón de aspersión traslapado a 9 x 18 m con una velocidad del viento de 1.992 m/s.

En la figura 24, prueba 2 se muestra la distribución de la pluviometría en el patrón traslapado a 9 x 18 metros entre aspersores, obteniendo como resultado en el cálculo de la uniformidad de distribución (UD) un valor de 87.65 % con el método de Christiansen y un 85.16 % de uniformidad con el método de Wilcox.

5.3 Comparación de los Coeficientes de Uniformidad Afectados por el Viento.

En el siguiente cuadro se muestran los resultados de CU calculados con el método de Christiansen en los diferentes espaciados y velocidades de vientos de la prueba de pluviometría.

El coeficiente de uniformidad para un sistema de aspersión estacionario depende principalmente del patrón de distribución de la pluviometría y del espaciado entre los aspersores adyacentes (Keller y Bliesner 1990)

$$\text{CUC} = 100 * (1 - (\text{suma de valores absolutos} / (\# \text{ de lecturas} * \text{media})))$$

Cuadro 6. Valores de CU calculados con el método de Christiansen, en los diferentes espaciamientos y velocidades del viento.

Velocidad de viento m/s	Presión (PSI)	CU Coeficiente de uniformidad CUC (%)							
		9 x 9 m	9 x 12 m	9 x 15 m	9 x 18 m	12 x 12 m	12 x 15 m	12 x 18 m	12 x 21 m
1.871	25					86.21	84.64	84.38	78.96
1.992	25	90.19	88.59	88.07	87.65				
2.479	25					86.46	84.36	84.79	82.24
2.647	25	83.39	84.48	82.71	77.9				

En el siguiente cuadro se muestran los resultados de CU calculados con el método de Wilcox en los diferentes espaciados y velocidades de vientos de la prueba de pluviometría.

$$\text{CUW} = 100 * (1 - (\text{Desviación estándar} / \text{Promedio}))$$

Cuadro 7. Valores de CU calculados con el método de Wilcox, en los diferentes espaciamientos y velocidades del viento.

Velocidad de viento m/s	Presión (PSI)	CU Coeficiente de uniformidad CUW (%)							
		9 x 9 m	9 x 12 m	9 x 15 m	9 x 18 m	12 x 12 m	12 x 15 m	12 x 18 m	12 x 21 m
1.871	25					82.95	80.96	79.26	70.92
1.992	25	87.49	86.14	86.73	85.16				
2.479	25					80.09	79.94	79.8	78.1
2.647	25	79.2	81.27	76.95	71.78				

En las tablas anteriores se puede observar variaciones en los cálculos con los métodos utilizados, con el método de Wilcoxon se muestra porcentajes más bajos que la del método de Christiansen debido a los diferentes parámetros que ellos utilizan en sus fórmulas.

La uniformidad se debe por la forma del patrón de aspersión, simetría o asimetría. En la mayoría de los aspersores la simetría del patrón circular de aspersión podría dividirse en dos mitades equivalentes, cada una de la imagen de espejo de la otra, incluidos los aspersores de giro sectorial. La proporción adecuado de la precipitación está en función del traslape y la armonía de la posición de las partes o puntos de la cuadrícula unos respecto a otros, y con referencia a la posición de la línea regante por donde pasa el eje de simetría, al mover el eje de simetría el aspersor llega a traslaparse consigo mismo y los puntos de la parte izquierda encuentra posición de coincidencia con los puntos de la parte derecha. En campo se pierde la simetría de las partes debido a la distorsión del patrón de aspersión influidos por el viento (dirección y velocidad), variación de la presión, desgaste de la boquilla y variación de la rapidez de giro en aspersión con mecanismo de impulso/movimiento.

También influye la prueba de manejo de agua y los cambios de movimiento de la línea regante, la elevación topográfica, la pérdida de carga debido a fricción.

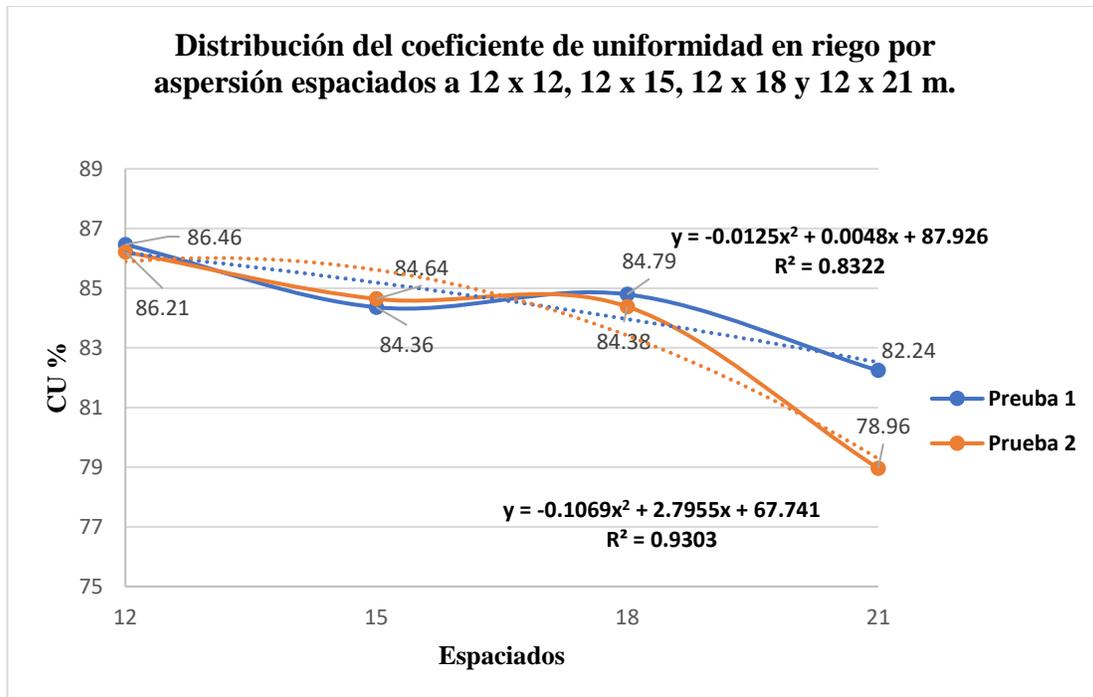


Figura 25. Tendencia de los valores de CU calculados con espaciados a 12 x 12, 12 x 15, 12 x 18 y 12 x 21 m con el método de Christiansen.

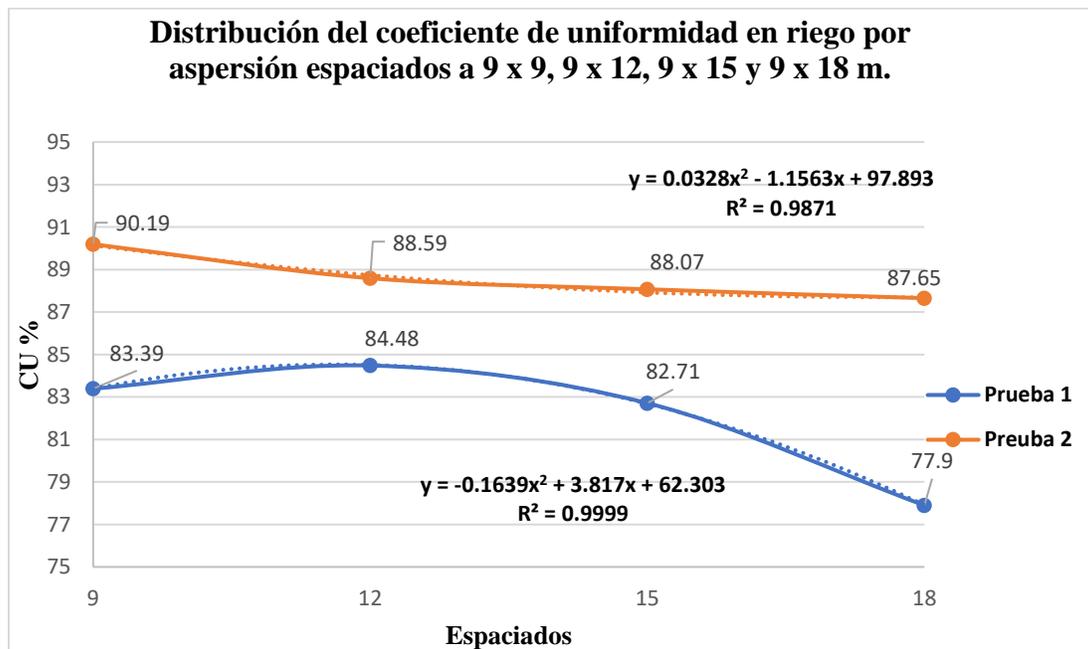


Figura 26. Tendencia de los valores de CU calculados con espaciados a 9 x 9, 9 x 12, 9 x 15 y 9 x 18 m con el método de Christiansen.

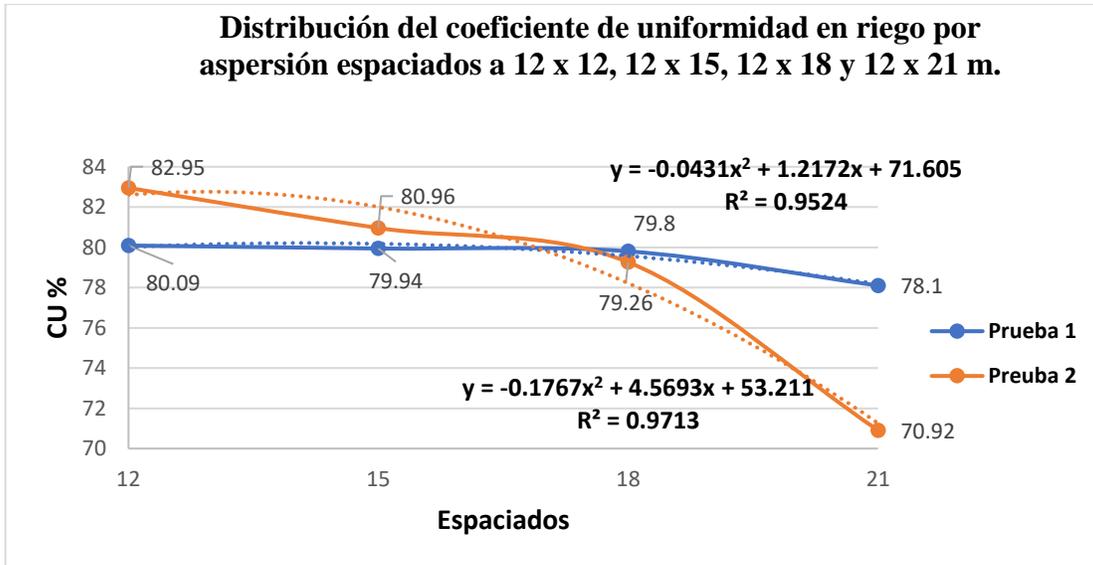


Figura 27. Tendencia de los valores de CU calculados con espaciados a 12 X 12, 12 x 15, 12 x 18 y 12 x 21 m con el método de Wilcox.

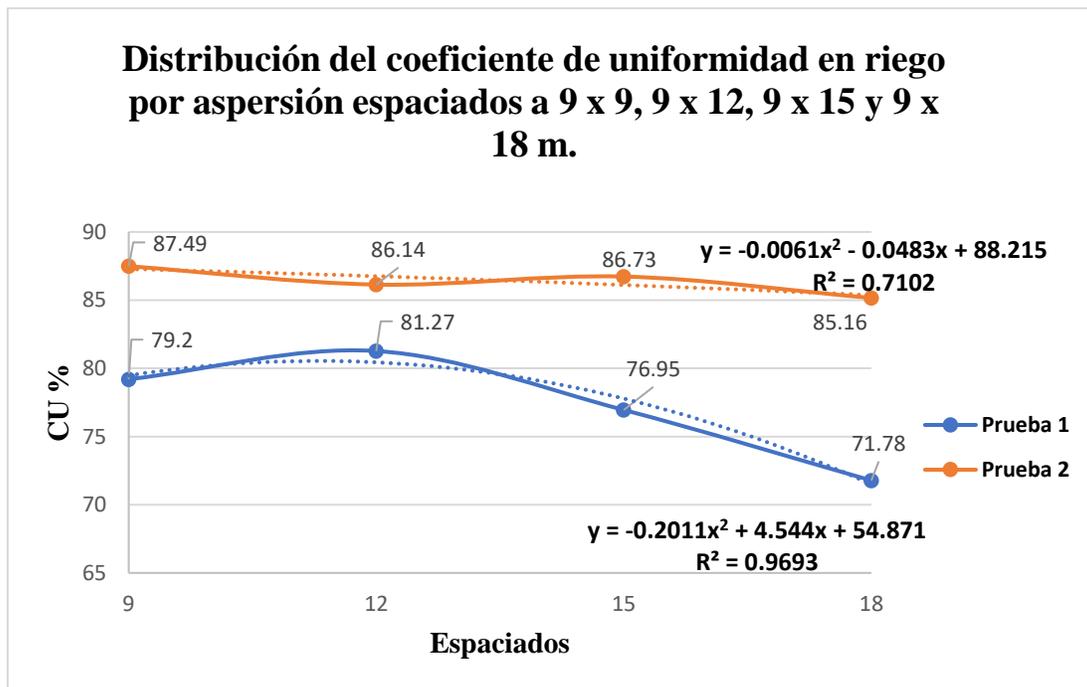


Figura 28. Tendencia de los valores de CU calculados con espaciados a 9 X 9, 9 x 12, 9 x 15 y 9 x 18 m con el método de Wilcox.

En las gráficas anteriores se muestra las líneas de tendencias sobre el comportamiento de los valores de CU que se obtuvieron al procesar los datos obtenidos en campo.

Teniendo los datos de la evaluación de pluviometría necesarios, las velocidades del viento se pueden determinar con un anemómetro y comparar los resultados obtenidos con los valores de CU establecidos en los criterios de evaluación para los diferentes espaciamientos entre aspersores mencionados por Christiansen y Wilcox.

Christiansen menciona en su criterio que se tiene que obtener valores aceptables por encima del 80% y Wilcox por encima del 75 % de CU, también los valores que la empresa Rain Bird considera como excelentes, son valores de 80 a 90 %, mientras que valores clasificados de 70 a 80 % son buenos y para valores menores de 70% son deficientes, por lo que se realizará la evaluación con los valores obtenidos durante la prueba.

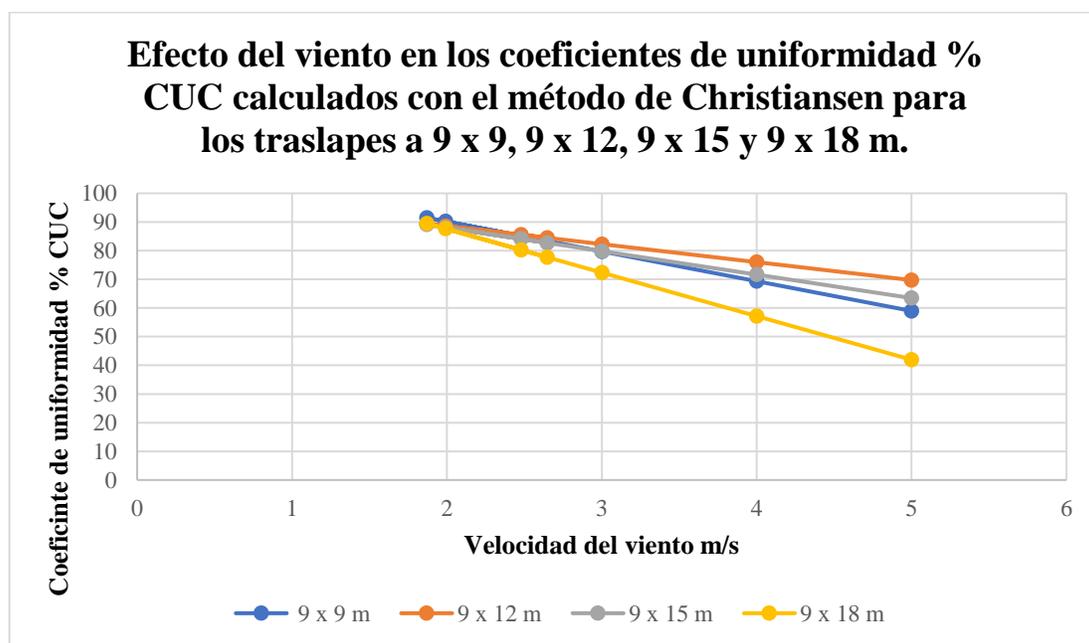


Figura 29. Efecto del viento en los coeficientes de uniformidad % CUC calculados con el método de Christiansen para los traslapes a 9 x 9, 9 x 12, 9 x 15 y 9 x 18 m.

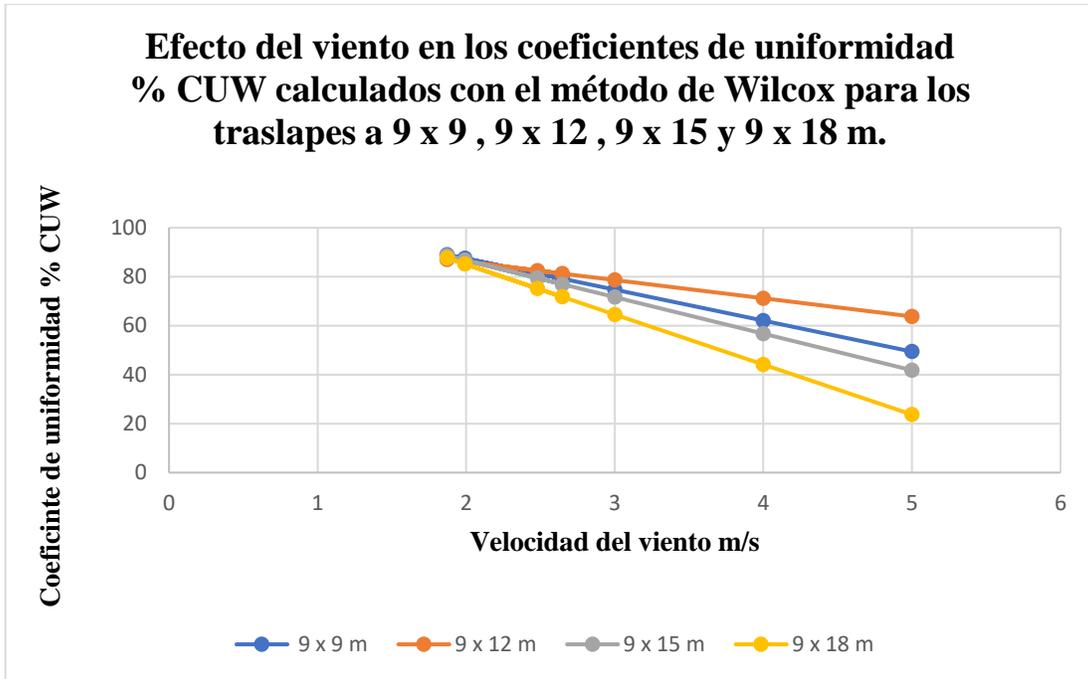


Figura 30. Efecto del viento en los coeficientes de uniformidad % CUW calculados con el método de Wilcox para los traslapes a 9 x 9, 9 x 12, 9 x 15 y 9 x 18 m.

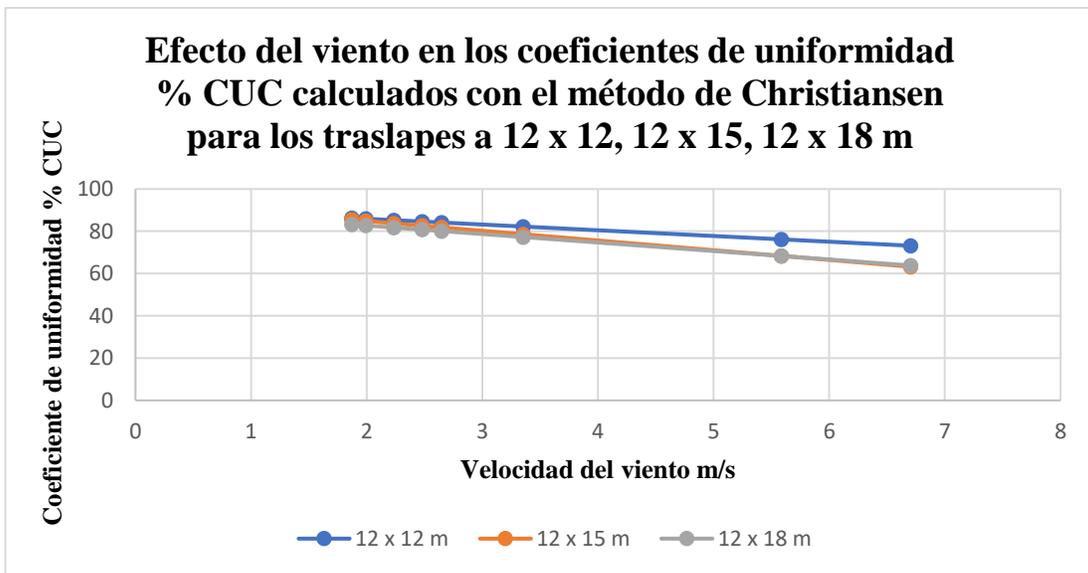


Figura 31. Efecto del viento en los coeficientes de uniformidad % CUC calculados con el método de Christiansen para los traslapes a 12 x 12, 12 x 15, 12 x 18 m.

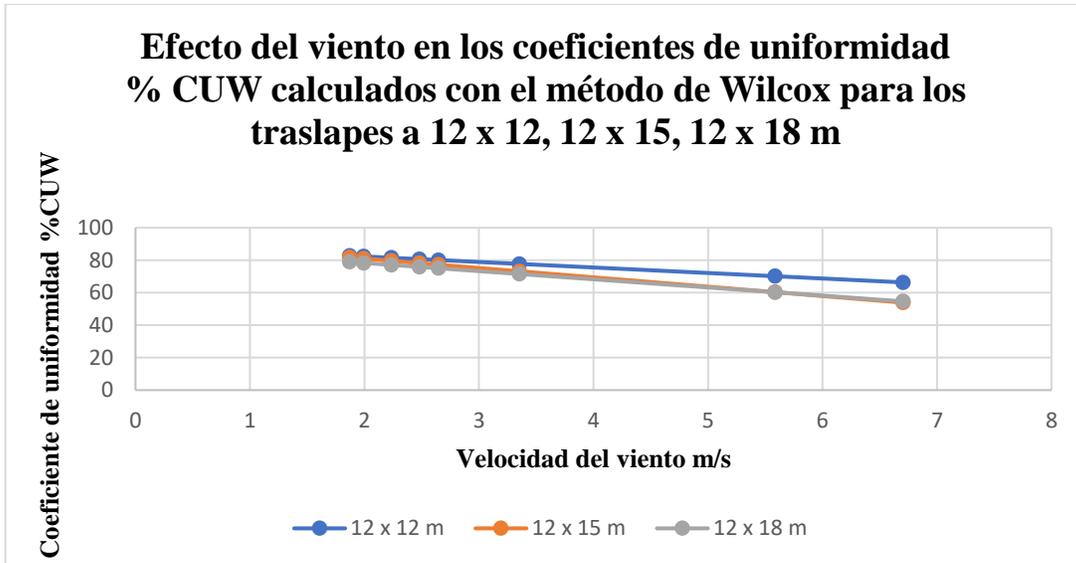


Figura 32. Efecto del viento en los coeficientes de uniformidad % CUC calculados con el método de Wilcox para los traslapes a 12 x 12, 12 x 15, 12 x 18 m.

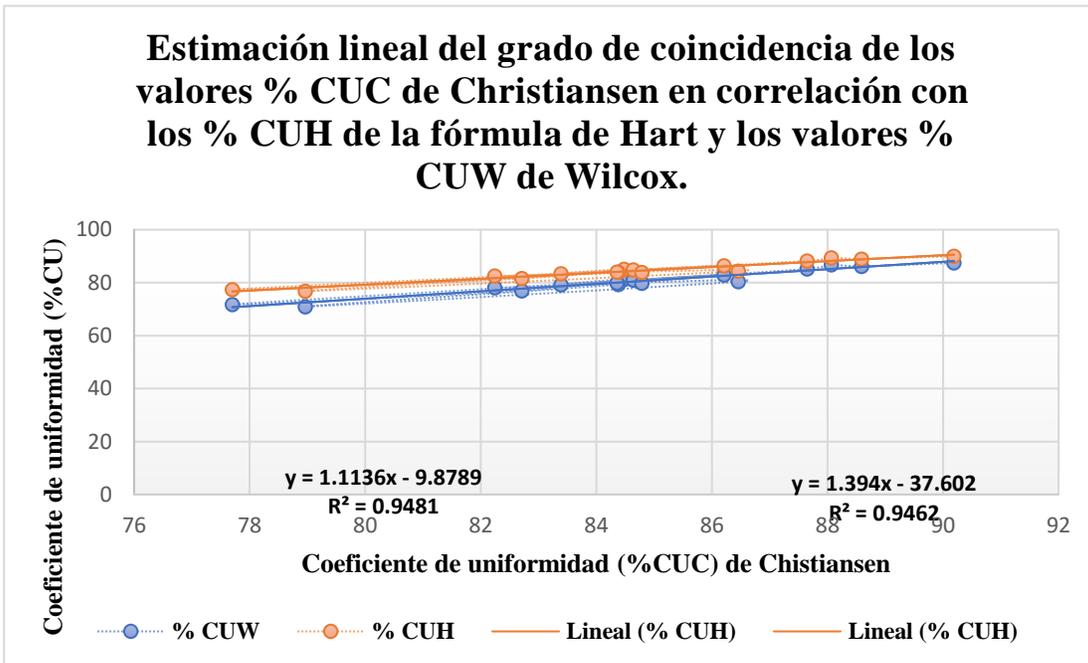


Figura 33. Estimación lineal del grado de coincidencia de los valores de % CUC de Christiansen en correlación con los % CUH de Hart y los valores % CUW de Wilcox.

6. CONCLUSIONES

Dado los resultados obtenidos en la evaluación de uniformidad de la distribución a diferentes espaciados del riego por aspersión, se puede concluir que:

Para los espaciados 12 x 12, 12 x 15, 12 x 18, 12 x 21, 9 x 9, 9 x 12, 9 x 15 y 9 x 18 se obtuvo valores por encima del 70 %, 75 % y 80 % de coeficiente de uniformidad, basándose en el criterio de Christiansen, Wilcox y los valores propuestas por Rain Bird, se puede determinar que son valores aceptables, por lo tanto, se recomienda el aspersor P5-R marca Rain Bird para los espaciados mencionados.

A excepción para la segunda prueba con espaciado de 12 x 21, velocidad del viento 1.871 m/s con valor de coeficiente de uniformidad del 78.96 % con el método de Christiansen, y un 70.91 con el método de Wilcox, por lo que basándose en el criterio propuesto por los antes mencionados se encuentra por debajo del valor aceptable, se puede considerar como deficiente, esta disminución puede ser causada por la variación de la velocidad del viento durante la prueba, la presión o por el aumento del espaciado entre aspersores, por lo que velocidades menores a 2.5 m/s no causan distorsión significativa en la distribución de la uniformidad y velocidades mayores a 2.5 m/s si causan distorsión significativa en la distribución de la uniformidad.

De mismo modo para la primera prueba con espaciado de 9 x 18 m, con una velocidad del viento de 2.647 m/s, con valor de coeficiente de uniformidad del 77.7 % con el método de Christiansen y un 71.78 % con el método de Wilcox, por lo que basándose en el criterio propuesto por los antes mencionados se encuentra por debajo del valor aceptable, por lo que se puede considerar como valores deficiente, por lo que velocidades de vientos menores a 2.5 no causan distorsión significativo en la distribución de la uniformidad y mayores a 2,5 m/s si causan distorsión significativa en la distribución de la pluviometría a mayor espaciado.

6.1 Propuesta de mejora para el uso del aspersor

Se recomienda regar por la madrugada o en la mañana cuando la intensidad del viento sea menos intensa, para obtener buena distribución de la lluvia del aspersor dentro del espaciado requerido, garantizar resultados y evitar distorsión por los efectos del viento.

Tener un sistema bien diseñado también es un factor sumamente importante para garantizar efectividad para el sistema, trabajar con la presión adecuada es indispensable también para el buen funcionamiento y asegurar la productividad de los cultivos a regar

7. BIBLIOGRAFÍA

Andrade, L.M., et al (2022). Uniformity of water distribution by a sprinkler irrigation system on a soccer field. *Bioscience Journal*. 2022, 38, e38012. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-57028>.

Alejos Asencio C. S., 2018. Distribución de la uniformidad del agua de riego para diferentes condiciones de viento y aspersión en las áreas verdes, UNALM. Tesis de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.

Bernardo, S., A. A, Soares, e. C. Montovani. 2009. Manual de Irrigação. 8a . ed. Imprensa Universitária. Viçosa/MG, 355 p.

Burt, C.M. y Styles, S.W. 2000. Riego por goteo y por microaspersión para árboles, vides y Cultivos anuales. Trad. JA Forero. Groves Beach, Central Coast Printing.

Casillas, G. Briones, (1986), Diseño y Evaluación de Sistemas de Riego por Aspersión y Goteo.

Christiansen, J. E. (1942). Irrigation by sprinkling. California Agricultural Experimental Station Bulletin 670. University of California, Berkeley, California.

Cisneros-Zayas, et al 2019. El viento y su influencia en los parámetros de calidad del riego.

Díaz Quiroz V. S. y Herrera Pérez, M.R., 2019. Análisis de la uniformidad de intensidad de aplicación del agua. Tesis Managua Nicaragua.

Faci J. M., Bercero A., (1991). Efecto del viento en la uniformidad y en las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión. *Invest. Agr.: prod. Prot. Veg.* 6(2): 97-117.

FAO (2005), Uso de agua en la agricultura, Departamento de Agricultura y protección al consumidor.

Florez-Tuta, Natalia et al. Aplicación eficiente de agua en la superficie del suelo y en el perfil del suelo en un sistema de riego por aspersión. *Agrociencia* [online]. 2013, vol.47, n.2, pp.107-119. ISSN 2521-9766.

Flórez-Tuta, Natalia; Zution-Gonçalves, Ivo; Rodrigues-Calvacante Feitosa, Daniel; Agnellos-Barbosa, E. Augusto; Ponciano-de Deus, Fabio; Diego-Ribeiro, Maycon; Eiji-Matsura, Edson EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE AGUA EN LA SUPERFICIE Y EN EL PERFIL DEL SUELO EN UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN, *Agrociencia*, vol. 47, núm. 2, 2013, pp. 107-119, Colegio de Postgraduados Texcoco, México.

Gino Eduardo Ipurre Tobar (2017), “Mejoramiento del Sistema de Riego Para el Sector Ilushcapampa Baja, Distrito de Cajamarca, Provincia de Cajamarca, Región Cajamarca” Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima – Perú (2017).

Heerman D. F., Walleder W. W et Bos M. G., (1990). Irrigation efficiency and uniformity. En *Management of Farm Irrigation Systems*. Hoffman G. J., Howell T. A. et Solomon K. H. Eds. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich. Pp: 125-149.

Interempresa (2010), Caracterización de la distribución del agua en riego por aspersión estacionario.

José M^a Faci González (2013), efecto de la baja presión en la uniformidad, Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC) Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria.

José María Peralta A, Christian Simpfendörfer L, (2001), Riego por Aspersión: Instituto de Investigaciones Agropecuarias Centro Regional de Investigación Carrillanca. Febrero 2001.

José M^a Tarjuelo Martín-Benito, (2005), El Riego por Aspersión.

Keller, J., Bliesner, R.D., (1990). *Sprinkler and Trickle Irrigation*. AVI Book. Van Nostrand Reinhold. New York, NY, USA.

Laserna Arcas, S., Montero Martínez, J., Sheikhesmaeili, O., Alcázar Bascuñana, E., (2016), análisis de la uniformidad de riego en un sistema de aspersión semiportátil con aspersor de gran tamaño. C13, XXXIV Congreso Nacional de Riegos, Sevilla 2016.

Luis Santos Pereira, J. Arturo de Juan V., M. Raquel Picornell B., J. María Tarjuelo M.B., CEER – Centro de Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomía, Universidade Técnica de Lisboa Tapada de Ajuda 1349-017 Lisboa. Portugal. Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Campus Universitario s/n. 02071 Albacete. España. El Riego y sus Tecnologías.

Martínez Edwin, Guía del trabajo práctico No. 12. Diseño de un sistema de riego por aspersión.

Miguel Loaiza, (2021), Riego tecnificado en ministerio de la agricultura, ganadería, acuicultura y pesca, LinkedIn.

M. Jacqueline Macias M, M. Monserrate V. S, Verónica Rosio M. S., Miguel A. Bazurto Z. (2011), adaptación e instalación de un sistema de riego por aspersión, para cultivos comerciales establecidos en la comunidad El Milagro del cantón Portoviejo.

Muñoz Valdés, J.M., _____. Determinación del efecto del viento sobre la uniformidad del riego por aspersión bajo cobertura total en un marco de 12x15 m. Universidad de Talca. Dspace.

Pedro José Díaz Martínez, (2021), Estudio de la uniformidad de un sistema de riego y estrategias para su mejora. Servicio de Asesoramiento al Regante en Comunidad de Sur Andevalo, 6 de sept. De 2021. LinkedIn.

Phocaidés, A. (2007). Handbook on pressurized irrigation techniques. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2nd Edition. Rome, Italy.

Rain Bird, (2010), uniformidad de la distribución en riego por aspersión.

Rain Bird, 2022. Consejos de diseño. Cálculo de la pluviometría. Rain Bird México, S. de R.L. Jesús García #2477, Lomas de Guevara, Guadalajara, Jalisco CP 44657. [Rainbird.com/es/consejos-de-diseno-de-riego-calculo-de-pluviometria](https://rainbird.com/es/consejos-de-diseno-de-riego-calculo-de-pluviometria).

Riego por aspersión, Equipo Docente, Unidad 8, Biblioteca Digital. Aula virtual.agro.edu.ar/pluginfile/php.

Solomon, KH. (1983). Irrigation uniformity and yield theory. Doctoral Thesis. Univ. Utah State. USA.

Stambouli Tatel, Zapata Nery, Playán Enrique y Faci José M., _____. Determinación al aire libre de la curva radial de descarga de agua de un aspersor con boquillas de plástico.

Congreso Nacional de Regadíos Modernizados. Academia.edu, Zaragoza, España. Academia.edu/54648039/net

Stambouli T., Nery Zapata, E. Playán y J. M. Faci (2014), La uniformidad del riego en coberturas fijas de aspersión con aspersores provistos de boquillas de plástico. Universidad de Cartago, Ecole Supérieure d'Agriculture, Mograne 1121, Túnez, Departamento de Suelo y Agua, Estación Aula Dei Experimental (EEAD-CSIC) Avenida Montañana 1005, 50059 Zaragoza, España, Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC), Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), Avenida Montañana 930, 50059 Zaragoza, España. Terra no 220 (año 2014).

Tarjuelo J.M. 1999. El riego por aspersión y su tecnología (2ª ed.), Ediciones Mundiprensa, Madrid España.

Traxco (1991), Efectos del viento en sistemas pivot.

Wilcox, J.C y G.E. Swailes. 1947. "Uniformity of Water Distributions by some Under-treet Orchard Sprinklers". Scientific Agriculture 27(11). 565-583

Xin, Haijun, Yan, Zhang y Chen, (2020), Un método simplificado para mejorar la distribución del agua y la uniformidad de la aplicación para el riego por aspersión en terrenos inclinados: ajuste de orientación del elevador.

8. ANEXOS

Cuadro 8. Datos de pluviometría recolectados en campo para la prueba 1 y 2.

	12 m	9 m	12 m	9 m
# colectores	Prueba 1	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 2
1	64	80	84	88
2	48	71	59	68
3	44	62	57	72
4	47	77	51	88
5	57	68	83	67
6	47	56	56	63
7	49	60	60	65
8	35	51	47	64
9	47	18	59	54
10	39	58	54	65
11	39	56	48	61
12	30	47	33	48
13	34	48	45	64
14	46	22	60	50
15	43	15	49	35
16	39	31	39	45
17	40	43	47	50
18	35	40	49	40
19	31	20	29	43
20	23	17	22	42
21	19	7	28	29
22	32	13	46	13
23	36	14	45	23
24	23	11	24	20
25	32	14	16	4
26	40	6	25	13
27	26	0	24	19
28	19	9	28	7
29	19	11	15	8
30	14	6	13	11
31	8		17	
32	8		22	
33	12		3	
34	11		1	
35	9		5	

36	11		8	
37	16		2	
38	11		1	
39	5		3	
40	4		2	

Cuadro 9. Datos de la pluviometría calculados, traslape a 12 x 12 m prueba 1.

105	74	66	95
98	81	71	73
80	74	75	61
58	62	53	66
Datos			
Promedio	74.5	# lecturas	16
Prom. min	53.8	media	71.81
Desv. estandar	14.624	sumatoria	174
UD =	82.36	% CUC	84.36
% CUW =	80.09		

Cuadro 10. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 15 m prueba 1.

69	66	59	66	80
58	86	67	53	59
58	69	67	47	49
46	54	46	38	51
Desv. estandar	11.953			
promedio	59.4	# lecturas	20	
pro min	45.2	Media	59.6	
UD	76.09	Sumatoria	189.6	
% UDW =	79.94	% CUC	84.36	

Cuadro 11. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 18 m prueba 1.

57	46	51	59	63	64
47	57	72	49	50	48
49	52	62	39	44	44
35	50	42	31	34	47

Desv. Estandar	10.0	# lecturas	24
Promedio	50	Media	49.67
Pro min	34.75	Sumatoria	181
% UDW	79.81	% CUC	84.79

Cuadro 12. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 21 m prueba 1.

57	34	31	51	56	47	64
47	46	43	54	46	39	48
49	43	45	34	36	39	44
35	39	34	27	27	30	47
Desv. estandar	9.32	# lecturas	28			
Promedio	42.57	Media	42.57			
Prom min	33.75	Sumatoria.	211.57			
% UDW	78.10	% CUC	82.24			

Cuadro 13. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 9 m prueba 1.

125	118	111	
90	107	114	
71	65	102	
Promedio	100.33	# lecturas	9
Pro min	75.33	Media	100.33
Desv. estandar	20.87	Sumatoria	150
CUW	79.20	CUC	83.39

Cuadro 14. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 12 m prueba 1.

97	106	91	93
85	78	94	85
63	62	58	73
Promedio	82.08	# lecturas	12
Pro min	61.00	Media	82.08
Desv. estandar	15.37	Sumatoria	152.83

% CUW	81.27	% CUC	84.48
-------	-------	-------	-------

Cuadro 15. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 15 m prueba 1.

91	78	79	73	89
74	73	65	65	82
56	54	55	29	68
Promedio	68.73	# lecturas	15	
Pro min	48.50	Media	68.75	
Desv. estandar	15.84	Sumatoria	178.37	
% CUW	76.95	% CUC	82.71	

Cuadro 16. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 18 m prueba 1.

77	72	51	61	69	80
68	62	60	36	62	71
56	47	47	26	24	62
Promedio	57.28	# lecturas	18		
Pro min	41.00	Media	57.28		
Desv. estandar	16.16	Sumatoria	227.89		
% CUW	71.78	% CUC	77.9		

Cuadro 17. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 12 m prueba 2.

99	92	87	99
81	109	100	72
84	78	93	74
75	61	57	73
Promedio	84.9375	# lecturas	16
Pro min	70	Media	83.38
Desv. estandar	14.49	Sumatoria	183
% CUW	82.95	% CUC	86.21

Cuadro 18. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 15 m prueba 2.

86	61	75	74	86
57	85	95	67	60
65	73	74	65	60
55	67	46	55	53
Promedio	67.95	# lecturas	20	
Pro min	53.2	Media	67.95	
Desv. estandar	12.93	Sumatoria	208.8	
% CUW	80.96	% CUC	84.649	

Cuadro 19. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 18 m prueba 2.

83	48	44	62	61	84
56	61	71	62	55	59
60	54	69	46	51	57
47	47	52	44	35	51
Promedio	56.625	# lecturas	24		
Pro min	44.43	Media	56.62		
Desv. estandar	11.74	Sumatoria	240		
% CUW	79.26	% CUC	84.38		

Cuadro 20. Datos de pluviometría calculados, traslape a 12 x 21 m prueba 2.

83	45	31	31	49	59	84
56	60	47	38	50	54	59
60	49	50	41	32	48	57
47	39	32	50	24	33	51
Promedio	48.54	# lecturas	28			
Pro min	32.5	Media	48.54			
Desv. estandar	14.11	Sumatoria	285.93			
% CUW	70.92	% CUC	78.96			

Cuadro 21. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 9 m prueba 2.

145	130	133	
117	125	118	
98	102	112	
Promedio	120	# lecturas	9
Pro min	100	Media	120
Desv. estandar	15.02	Sumatoria	106
% CUW	87.49	% CUC	90.19

Cuadro 22. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 12 m prueba 2.

131	122	110	124
109	111	114	100
92	83	94	92
Promedio	106.83	# lecturas	12
Pro min	92.2	Media	106.83
Desv. estandar	14.81	Sumatoria	146.33
% CUW	86.14	% CUC	88.59

Cuadro 23. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 15 m prueba 2.

92	108	102	101	95
80	103	100	96	76
82	77	75	74	83
Promedio	89.6	# lecturas	15	
Pro min	80.6	Media	89.6	
Desv. estandar	11.89	Sumatoria	160.4	
% CUW	86.73	% CUC	88.07	

Cuadro 24. Datos de pluviometría calculados, traslape a 9 x 18 m prueba 2.

88	69	88	93	72	88
67	74	92	82	72	68
63	67	69	55	65	72
Promedio	74.67	# lecturas	18		
Pro min	65.38	Media	74.67		
Desv. estandar	11.08	Sumatoria	166		
% CUW	85.16	% CUC	87.65		