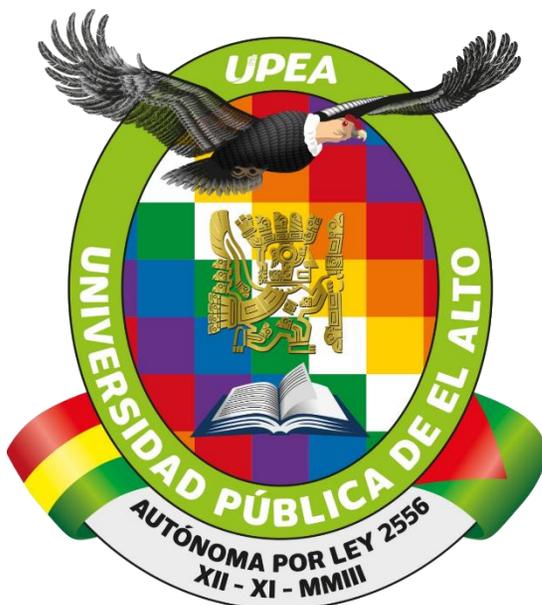


**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO  
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS  
Y RECURSOS NATURALES  
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



**TESIS DE GRADO**

**EVALUACIÓN TÉCNICA DE ASPERSORES COMERCIALES PARA  
RIEGO CON MECANISMOS DE GIRO POR REACCIÓN E IMPACTO  
EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE KALLUTACA**

**Por:**

**Rosayda Guachalla Chambi**

**EL ALTO – BOLIVIA**

**Octubre, 2024**

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO  
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS  
Y RECURSOS NATURALES  
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**EVALUACIÓN TÉCNICA DE ASPERSORES COMERCIALES PARA RIEGO CON  
MECANISMOS DE GIRO POR REACCIÓN E IMPACTO EN LA ESTACIÓN  
EXPERIMENTAL DE KALLUTACA**

*Tesis de Grado presentado  
como requisito para optar el Título de  
Ingeniera Agrónoma*

**Rosayda Guachalla Chambi**

**Asesores:**

Lic. Ing. Guiber Guarachi Condori .....

M. Sc. Lic. Ing. Ramiro Raúl Ochoa Torrez .....

**Tribunal Revisor:**

Lic. Ing. Freddy Ayala Huacara .....

M. Sc. Lic. Ing. Simar Fernando Catari Condori .....

M. Sc. Lic. Ing. Alfredo Ronald Veizaga Medina .....

**Aprobada**

Presidente Tribunal Examinador .....



**DEDICATORIA:**

*A Dios por darme la vida y concederme los  
anhelos de mi corazón, por su infinita bondad y  
amor.*

*Para mis padres Gregoria Chambi Tola y Raúl  
Juan Guachalla Nina por su apoyo incondicional,  
inspiración, afecto que siempre me brindan.*

*A mi hermana: Deysi Guachalla Chambi, por sus  
palabras de aliento y ánimo.*

*A mi Abuelo Andrés Guachalla Larico que Dios lo  
tenga en su gloria y ahora es un ángel en mi vida  
y sé que se encuentra muy orgulloso y desde  
donde esta me bendice.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a Dios por la vida, por permitirme tener y gozar a mi familia, también debo dar las gracias a ellos por apoyarme en cada elección y emprendimiento, gracias por ayudarme a realizar y terminar con éxito esta tesis, gracias a la vida porque todos los días me revela lo hermosa y lo justa que es.

A mi querida mamá por ser la inspiración para ser mejor cada vez y llegar más alto sin importar los límites, por sus palabras de aliento y ayudarme a no rendirme.

A la Universidad Pública de El Alto, a la Carrera de Ingeniería Agronómica, a todos los docentes quienes guiaron mi camino y me formaron en el transcurso de toda la carrera.

A mis asesores Lic. Ing. Guiber Guarachi Condori, por toda la paciencia que tuvo para orientarme y brindarme su apoyo durante toda la etapa de investigación es un ejemplo a seguir, un excelente profesional; y al M. Sc. Lic. Ing. Ramiro Raúl Ochoa Torrez gracias por el apoyo, por los consejos, comprensión y guiarme en la culminación del presente trabajo de tesis.

Un agradecimiento especial, al Tribunal Examinador:

Lic. Ing. Freddy Ayala Huacara, M. Sc. Lic. Ing. Simar Fernando Catari Condori y al M. Sc. Lic. Ing. Alfredo Ronald Veizaga Medina, por el interés mostrado desde el inicio para el emprendimiento de esta tesis, por las sugerencias y correcciones coadyuvando con mucha paciencia en su desarrollo muchas gracias.

Agradecer a todos mis amigos y compañeros por los buenos momentos que hemos compartido, Joel Miranda Callisaya, Lizet Mamani Calle, Deysi Chura García, Roxana Chambi García, por todo el apoyo brindado durante la carrera.

## CONTENIDO

ÍNDICE DE TEMAS.....	i
ÍNDICE DE CUADROS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xii
ABREVIATURAS .....	xiii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT .....	xv

## ÍNDICE DE TEMAS

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes .....	2
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos .....	4
1.4.1. Objetivo general .....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1. Normativa en el sector riego .....	5
2.2. El riego .....	5
2.2.1. Riego agrícola .....	5
2.3. Métodos de riego tecnificado .....	6
2.3.1. Riego localizado .....	7
2.3.2. Riego por aspersión .....	7

2.3.2.1.	Ventajas y desventajas del riego por aspersión .....	7
2.3.2.2.	Componentes básicos de un sistema de riego por aspersión .....	9
2.3.2.3.	Aspersores empleados en el riego .....	9
2.3.2.3.1.	Tipos de aspersores .....	13
2.3.2.3.2.	Selección del aspersor .....	15
2.3.2.4.	Diseño de riego por aspersión.....	16
2.3.2.4.1.	Diseño agronómico.....	16
2.3.2.4.2.	Diseño Hidráulico.....	17
2.4.	Evaluación del riego por aspersión .....	17
2.4.1.	Parámetros y conceptos de la evaluación de riego por aspersión .....	18
2.4.1.1.	Uniformidad de distribución (UD).....	18
2.4.1.2.	Coeficiente de uniformidad (CU) .....	19
2.4.1.3.	Eficiencia de riego .....	20
2.4.1.4.	Eficiencia de aplicación (Ea) .....	21
2.4.1.5.	Eficiencia de distribución (EDa).....	22
2.4.1.6.	Perdida por evaporación y arrastre por el viento (Pe).....	22
2.4.1.7.	Pérdidas por fugas en conducciones (Pd).....	23
2.4.2.	Factores que afectan la eficiencia en riego por aspersión .....	23
2.4.2.1.	Modelo de reparto de agua del aspersor.....	26
2.5.	Simulación de riego por aspersión .....	26
3.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	27
3.1.	Localización.....	27
3.1.1.	Ubicación Geográfica .....	27
3.1.2.	Características Edafoclimáticas .....	28
3.1.2.1.	Clima .....	28
3.1.2.2.	Suelo .....	28

3.1.2.3.	Flora .....	28
3.1.2.4.	Fauna .....	29
3.2.	Materiales .....	29
3.2.1.	Material de estudio .....	29
3.2.2.	Material de escritorio .....	29
3.2.3.	Material para la instalación del riego por aspersión .....	29
3.2.4.	Material para la evaluación del riego por aspersión .....	30
3.2.5.	Software para análisis de datos e información de campo .....	31
3.3.	Metodología.....	31
3.3.1.	Fase de implementación de riego .....	31
3.3.1.1.	Implementación unidad de bombeo .....	31
3.3.1.2.	Apertura fuente de agua.....	31
3.3.1.3.	Instalación red de tuberías .....	32
3.3.1.4.	Aspersores .....	36
3.3.1.4.1.	Selección del aspersor .....	36
3.3.1.5.	Muestreo de agua.....	36
3.3.1.6.	Determinación de las características hidráulicas.....	37
3.3.1.7.	Principales parámetros de evaluación.....	37
3.3.1.7.1.	Características hidráulicas.....	38
3.3.1.7.2.	Parámetros e indicadores en evaluación.....	39
3.3.2.	Fase de evaluación de riego .....	42
3.3.2.1.	Evaluación de la red de pluviometría .....	42
3.3.2.2.	Determinación del caudal por el método volumétrico.....	42
3.3.2.3.	Modelo Estadístico .....	43
3.3.2.4.	Evaluación de un aspersor .....	44
3.3.3.	Fase de simulación de aplicación de riego por aspersión.....	44

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	46
4.1.	Características de la calidad del agua .....	46
4.1.1.	Calidad del agua.....	46
4.2.	Parámetros climáticos durante el periodo de investigación .....	47
4.2.1.	Temperatura .....	47
4.2.2.	Velocidad del viento .....	48
4.2.3.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ).....	50
4.3.	Características hidráulicas de los aspersores Xcel Wobbler y 423 AG.....	50
4.3.1.	Caudal versus presión.....	51
4.3.2.	Radio mojado .....	52
4.3.3.	Índice de grosor de gotas .....	55
4.4.	Evaluación de las características hidráulicas en el sistema.....	57
4.4.1.	Comportamiento hidráulico de los dos tipos de aspersores.....	58
4.4.1.1.	Primera evaluación del aspersor Xcel Wobbler.....	58
4.4.1.2.	Segunda evaluación del aspersor Xcel Wobbler.....	61
4.4.1.3.	Tercera evaluación del aspersor Xcel Wobbler .....	63
4.4.1.4.	Cuarta evaluación del aspersor Xcel Wobbler .....	65
4.4.1.5.	Quinta evaluación del aspersor Xcel Wobbler.....	67
4.4.1.6.	Primera evaluación del aspersor 423 AG .....	69
4.4.1.7.	Segunda evaluación del aspersor 423 AG .....	71
4.4.1.8.	Tercera evaluación del aspersor 423 AG .....	74
4.4.1.9.	Cuarta evaluación del aspersor 423 AG.....	77
4.4.1.10.	Quinta evaluación del aspersor 423 AG .....	80
4.4.2.	Evaluación de un solo aspersor .....	82
4.4.3.	Coefficiente de uniformidad (CU%) .....	87
4.4.4.	Eficiencia de aplicación (EA%).....	88

4.5.	Simulación de riego por aspersión .....	90
4.5.1.	Simulación de riego para el aspersor Xcel Wobbler.....	90
4.5.2.	Simulación de riego para el aspersor 423 AG .....	92
5.	CONCLUSIONES .....	95
6.	RECOMENDACIONES .....	97
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	98
8.	ANEXOS .....	105

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ventajas e inconvenientes de los principales sistemas de riego.....	6
Cuadro 2. Clasificación de la Uniformidad de Distribución .....	19
Cuadro 3. Rango de coeficiente de uniformidad .....	20
Cuadro 4. Eficiencia de aplicación según método de riego .....	22
Cuadro 5. Parámetros de la calidad del agua .....	46
Cuadro 6. La evapotranspiración de referencia (mm/día), durante el transcurso de la evaluación .....	50
Cuadro 7. Caudal emitido por los aspersores Xcel Wobbler y 423 AG determinados en (l/s) y (l/h), según la presión de trabajo (bar), mediante el método volumétrico.....	51
Cuadro 8. Características hidráulicas del aspersor Xcel-Wobbler .....	53
Cuadro 9. Rendimientos obtenidos para los aspersores de impacto 423 AG.....	54
Cuadro 10. Parámetros para la primera evaluación del aspersor Xcel Wobbler .....	59
Cuadro 11. Parámetros para la segunda evaluación del aspersor Xcel Wobbler.....	61
Cuadro 12. Parámetros para la tercera evaluación del aspersor Xcel Wobbler .....	63
Cuadro 13. Parámetros para la cuarta evaluación del aspersor Xcel Wobbler.....	65
Cuadro 14. Parámetros para la quinta evaluación del aspersor Xcel Wobbler .....	67
Cuadro 15. Parámetros para la primera evaluación del aspersor 423 AG.....	69
Cuadro 16. Parámetros para la segunda evaluación del aspersor 423 AG .....	72
Cuadro 17. Parámetros para la tercera evaluación del aspersor 423 AG.....	75
Cuadro 18. Parámetros para la cuarta evaluación del aspersor 423 AG .....	78
Cuadro 19. Parámetros para la quinta evaluación del aspersor 423 AG .....	81
Cuadro 20. Medias t de Student para coeficiente de uniformidad .....	87
Cuadro 21. Medias t de Student para eficiencia de aplicación .....	88
Cuadro 22. Parámetro (Coeficiente de Uniformidad) del riego por aspersión para el aspersor Xcel Wobbler .....	90

Cuadro 23. Parámetro (Coeficiente de Uniformidad) del riego por aspersión para el aspersor 423 AG .....	92
--	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Sistema de riego estacionario .....	10
Figura 2.	Aspersor de impacto.....	10
Figura 3.	Aspersor sectorial.....	11
Figura 4.	Aspersor rotatorio de baja presión .....	11
Figura 5.	Aspersor de media presión.....	12
Figura 6.	Aspersor tipo cañón de alta presión .....	12
Figura 7.	Eficiencia del sistema de riego .....	21
Figura 8.	Distribución del agua en función de la presión de trabajo de los aspersores	24
Figura 9.	Distribución de humedad bajo el aspersor y el efecto del viento .....	25
Figura 10.	Ubicación del área de estudio .....	27
Figura 11.	Apertura de la fuente de agua.....	32
Figura 12.	Instalación de la red de tuberías y pluviómetros .....	33
Figura 13.	Diseño y ubicación del aspersor 423 AG en la zona de estudio .....	34
Figura 14.	Diseño y ubicación del aspersor Excel Wobbler en la zona de estudio .....	35
Figura 15.	Características de Aspersores: Xcel Wobbler, 423AG .....	36
Figura 16.	Evaluación del caudal por el método volumétrico .....	43
Figura 17.	Variaciones en la temperatura del aire durante los meses de evaluación, según los datos recopilados de la Estación Meteorológica de la carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad Pública de El Alto. ....	48
Figura 18.	Variación en la velocidad del viento (m/s) durante el proceso de evaluación, a partir de los datos recogidos de la Estación Meteorológica de la carrera de Ingeniería Agronómica .....	49
Figura 19.	Curva caudal versus presión (Q vs P), obtenido en campo .....	51
Figura 20.	Curvas del radio de alcance (m), con efecto del viento de 1,11 m/s en relación a la presión de funcionamiento, para aspersores Xcel Wobbler y 423 AG .....	53

- Figura 21. Curva del índice de grosor (IG), para una boquilla de 4,76 mm correspondiente al aspersor Xcel Wobbler y la boquilla de 4 mm correspondiente al aspersor 423 AG en relación a la presión de funcionamiento (IG vs P)..... 56
- Figura 22. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 9 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 88,8 %, a una velocidad del viento de 0,4 m/s. .... 58
- Figura 23. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 88, 8%..... 60
- Figura 24. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 9 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 90,7 %, a una velocidad del viento de 0,4 m/s. .... 61
- Figura 25. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 90,7%..... 62
- Figura 26. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 9 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 80,7 %, a una velocidad del viento de 0,7 m/s. .... 63
- Figura 27. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 80.7%..... 64
- Figura 28. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 9 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 78,5 %, a una velocidad del viento de 0,7 m/s. .... 65
- Figura 29. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 78,5%..... 66
- Figura 30. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 9 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 85,9 %, a una velocidad del viento de 0,4 m/s. .... 67
- Figura 31. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 85,9%..... 68
- Figura 32. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 14 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 79,10 %, a una velocidad del viento de 0,8 m/s. .... 69

- Figura 33. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 79,10%..... 70
- Figura 34. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 14 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 83,70 %, a una velocidad del viento de 0,8 m/s. .... 71
- Figura 35. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 83,70%..... 72
- Figura 36. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 14 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 84,70 %, a una velocidad del viento de 0,8 m/s. .... 74
- Figura 37. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 84,70%..... 75
- Figura 38. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 14 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 79,00 %, a una velocidad del viento de 1,0 m/s. .... 77
- Figura 39. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 79,00%..... 78
- Figura 40. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 14 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 83,00 %, a una velocidad del viento de 1,0 m/s. .... 80
- Figura 41. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 83,00%..... 81
- Figura 42. Representación gráfica tridimensional de la pluviometría (mm), obtenida de un aspersor Xcel Wobbler al aire libre, bajo una incidencia del viento de 0,83 m/s  
83
- Figura 43. Visualización espacial del área evaluada, en cuanto a la forma de reparto de agua, señalando las zonas con mayor y menor lámina de agua aplicada (mm).... 84
- Figura 44. Representación gráfica tridimensional de la pluviometría (mm), obtenida de un aspersor 423 AG al aire libre, bajo una incidencia del viento de 0,83 m/s ..... 85

Figura 45.	Visualización espacial del área evaluada, en cuanto a la forma de reparto de agua, señalando las zonas con mayor y menor lámina de agua aplicada (mm)....	86
Figura 46.	Medias t de Student para coeficiente de uniformidad .....	87
Figura 47.	Medias t de Student para eficiencia de aplicación .....	89
Figura 48.	Diagrama del volumen aplicado de la simulación de 5 espaciamientos para el aspersor Xcel Wobbler .....	92
Figura 49.	Diagrama del volumen aplicado de la simulación de 5 espaciamientos para el aspersor 423 AG.....	94

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Especificaciones técnicas Aspensor 423 AG .....	106
Anexo 2.	Especificaciones técnicas del Aspensor Xcel Wobbler .....	107
Anexo 3.	Armado de la red de tuberías, pluviómetros.....	109
Anexo 4.	Lecturas de presión de la bomba hidráulica, tuberías secundarias y dispositivos de riego.....	110
Anexo 5.	Evaluación de los pluviómetros .....	111
Anexo 6.	Análisis de la calidad de agua con el multiparámetro .....	111
Anexo 7.	Informe climatológico de los meses de agosto, septiembre y octubre de 2023 de la Estación Experimental Kallutaca en la Universidad Pública de El Alto .....	112
Anexo 8.	Resultados obtenidos del parámetro de Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CU %) y Eficiencia de aplicación (EA %), bajo incidencia del viento aspensor Xcel Wobbler .....	115
Anexo 9.	Resultados obtenidos del parámetro de Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CU %) y Eficiencia de aplicación (EA %), bajo incidencia del viento aspensor 423 AG .....	120
Anexo 10.	Simulación del riego por aspersion con 5 diferentes espaciamientos para el aspensor Xcel Wobbler .....	130
Anexo 11.	Simulación del riego por aspersion con 5 diferentes espaciamientos para el aspensor 423 AG .....	131
Anexo 12.	Recopilación de datos climáticos de la estación meteorológica situada en las instalaciones de la carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad Pública de El Alto .....	132

**ABREVIATURAS**

UD	Uniformidad de Distribución
CU	Coefficiente de Uniformidad
Ea	Eficiencia de Aplicación
Eda	Eficiencia de Distribución
Pe	Perdida por evaporación y arrastre por el viento
Pd	Perdidas por fugas en conducciones
pH	Potencial de hidrógeno o Potencial de hidrogeniones
Km	Kilómetro
Msnm	Metros sobre el nivel del mar
Mm	Milímetro
m	Metros
Lt	Litros
Hr	Horas
Vv	Velocidad del Viento
PVC	Policloruro de Vinilo
HDPE	High Density Polyethylene
TP	Tubería Principal
EE	Estación Experimental

## RESUMEN

Los sistemas de riego por aspersión permiten alcanzar una mayor eficiencia del uso del agua en el suelo. La tecnología de riego por sí misma no garantiza este objetivo, al ser necesario contar con un buen diseño agronómico e hidráulico, características del suelo, fuente de agua, cultivo y topografía. En la actualidad se llegan a encontrar en el mercado un sin fin de aspersores de riego a la venta, los cuales poseen diferentes parámetros y características físicas, en cuanto a los precios según el material empleado para la fabricación de estos, a esto se añade la presión de servicio necesaria para su correcto funcionamiento, que generalmente son de mediana y alta presión, lo que implica la suministración de mayor energía al agua en la red de tuberías, para que alcance dichas presiones.

El objetivo del trabajo de investigación, fue analizar las diferencias de los parámetros de Uniformidad y Eficiencia de Riego de los dos tipos de aspersores (Xcel Wobbler y 423 AG). En la Estación Experimental de Kallutaca al Oeste de la ciudad de El Alto, en el municipio de Laja, provincia Los Andes. Geográficamente se sitúa a 16° 31' 28" Latitud Sur, 68° 18' 32" Longitud Oeste y a una altitud de 3901 metros sobre el nivel del mar.

Se implementó el riego por aspersión con 4 aspersores, elevados a un metro de altura, también presento dos laterales, cada lateral con 2 porta-aspersores. Para la etapa de evaluación, se diseñó en el área de evaluación una malla donde se ubicaron los pluviómetros con una separación de 1 x 1 metros. Se evaluó el funcionamiento de los aspersores por 60 minutos, por cada tipo de aspersor se realizó 5 evaluaciones. En los resultados obtenidos de la evaluación de la uniformidad del riego por aspersión, se destaca al aspersor Xcel Wobbler con un Coeficiente de Uniformidad CU de 84,92 % y una Eficiencia de Aplicación de 78,62 %, para un marco de riego de 9 x 9, en comparación al aspersor 423 AG que presento un Coeficiente de Uniformidad CU de 81,9 % con una Eficiencia de Aplicación de 74,7 %. Por otra parte, con la simulación de la evaluación del riego por aspersión con los datos obtenidos de los pluviómetros, se obtuvo valores similares a los calculados, además se realizó la simulación de diferentes espaciamientos entre los aspersores, para obtener los parámetros de Uniformidad y su Eficiencia de riego.

## ABSTRACT

Sprinkler irrigation systems allow for greater efficiency in the use of water in the soil. Irrigation technology alone does not guarantee this objective, as it is necessary to have a good agronomic and hydraulic design, soil characteristics, water source, crop and topography. Nowadays, there are an endless number of irrigation sprinklers for sale on the market, which have different parameters and physical characteristics, in terms of prices depending on the material used to manufacture them, to this is added the service pressure necessary for their correct operation, which are generally medium and high pressure, which implies the supply of greater energy to the water in the pipe network, so that it reaches said pressures.

The objective of the research work was to analyze the differences in the Uniformity and Irrigation Efficiency parameters of the two types of sprinklers (Xcel Wobbler and 423 AG). At the Kallutaca Experimental Station west of the city of El Alto, in the municipality of Laja, Los Andes province. Geographically it is located at 16° 31' 28" South Latitude, 68° 18' 32" West Longitude and at an altitude of 3901 meters above sea level.

Sprinkler irrigation was implemented with 4 sprinklers, raised to a height of one meter, and two lateral sprinklers were also present, each lateral with 2 sprinkler holders. For the evaluation stage, a mesh was designed in the evaluation area where the rain gauges were located with a separation of 1 x 1 meters. The operation of the sprinklers was evaluated for 60 minutes, for each type of sprinkler 5 evaluations were carried out. In the results obtained from the evaluation of the uniformity of sprinkler irrigation, the Xcel Wobbler sprinkler stands out with a Uniformity Coefficient CU of 84.92% and an Application Efficiency of 78.62%, for a 9 x 9 irrigation frame, compared to the 423 AG sprinkler that presented a Uniformity Coefficient CU of 81.9% with an Application Efficiency of 74.7%. On the other hand, with the simulation of the evaluation of sprinkler irrigation with the data obtained from the rain gauges, values similar to those calculated were obtained. In addition, the simulation of different spacings between the sprinklers was carried out to obtain the parameters of Uniformity and its Irrigation Efficiency.

## 1. INTRODUCCIÓN

El altiplano es una región geográfica caracterizada por su elevada altitud y condiciones climáticas particulares, que presenta desafíos únicos para la agricultura. En este contexto, el riego por aspersión se ha convertido en una herramienta invaluable para maximizar la producción agrícola y garantizar la seguridad alimentaria en estas áreas.

Las condiciones de altitud elevada y la escasez de precipitaciones dificultan el suministro adecuado de agua a los cultivos, lo que podría comprometer su crecimiento y desarrollo. Sin embargo, el riego por aspersión ofrece una solución eficiente al proporcionar una distribución uniforme del agua sobre el campo de cultivo. Al superar las limitaciones hídricas y climáticas, y al proporcionar una distribución precisa y controlada del agua, el riego por aspersión se ha convertido en una herramienta indispensable para mejorar la seguridad alimentaria y promover el desarrollo sostenible en esta región.

Las evaluaciones de riego en campo sirven para determinar la distribución del agua del riego en la parcela, lo que permite diagnosticar la uniformidad del riego estableciendo niveles cuantitativos. Para poder alcanzar estos objetivos, se hace necesario la incorporación y el aprovechamiento de los avances científicos de ingeniería a los regadíos (principal usuario del agua), en el diseño y proyecto de los regadíos, pero también en el funcionamiento, conservación y manejo de los sistemas de riego en la explotación agrícola.

Antes de implementar un sistema de riego con aspersores en una determinada región, es común realizar pruebas exhaustivas para evaluar su rendimiento y eficacia. Estas pruebas pueden llevarse a cabo tanto en laboratorios especializados como en condiciones reales, como las del altiplano. Sin embargo, es importante destacar que, aunque los aspersores de riego se someten a pruebas rigurosas en el laboratorio, las condiciones del altiplano presentan desafíos y características únicas que pueden afectar su funcionamiento de manera diferente. El altiplano es conocido por su altitud elevada, bajas temperaturas, baja presión atmosférica y radiación solar intensa, entre otros factores.

Por tanto, aunque las pruebas en laboratorio son valiosas para obtener datos iniciales sobre el rendimiento de los aspersores de riego, es esencial realizar pruebas adicionales en condiciones reales del altiplano para garantizar su eficiencia y durabilidad. Estas pruebas de campo pueden proporcionar información precisa sobre cómo los aspersores se

desempeñarán en situaciones reales y permitir ajustes y mejoras específicas para adaptarse a las condiciones únicas del altiplano.

### **1.1. Antecedentes**

La agricultura campesina es el sector principal de la agricultura en Bolivia, pero sufre de bajos rendimientos debido a deficiencias en el manejo de factores de producción como el riego. Los altos costos de producción y la falta de tecnología de riego hacen que los cultivos sean vulnerables a condiciones climáticas adversas. Como resultado, los niveles de producción insuficientes para las familias de los agricultores, lo que aumenta su nivel de pobreza.

En Bolivia, el 97% de las actividades de riego se realiza a través de sistemas tradicionales por sus bajos costos de implementación, no obstante, la necesidad de altos volúmenes de agua se convierte en el principal problema, sumado a la baja eficiencia y uniformidad de éstos en la mayoría de los casos, lo cual se traduce en el desaprovechamiento de un recurso limitado como es el agua. Ante este panorama han surgido alternativas como el riego por aspersión, pero su implementación y adopción por los agricultores requiere de mayor información técnica, apoyada en experimentación de campo, considerando un escenario complejo de interacciones económicas, ambientales y sociales en el área rural (Paredes y Arragan, 2018).

Condori (2022), menciona que los aspersores Xcel Wobbler evaluados en la comunidad Ch'ejeje – Sorata, dieron como resultado el siguiente Coeficiente de Uniformidad CU para el 82,1 %, la Uniformidad de Distribución UD en el cuarto inferior de 69,62 %, y una Eficiencia de Aplicación de 76,31 %, para un marco de riego de 15 x 15, en condiciones de valle.

De acuerdo a revisión bibliográfica no existen datos con estudios realizados en el altiplano de La Paz con el aspersor (423 AG), entonces la presente investigación trata de dar respuesta a las variables relacionadas del aspersor.

## **1.2. Planteamiento del problema**

El desconocimiento técnico en cuanto a los parámetros de riego y características hidráulicas de los aspersores es uno de los problemas más comunes en los productores, estos mismos pueden no estar familiarizados con los diferentes tipos de aspersores disponibles en el mercado, sus características técnicas y la forma en que se adaptan a sus necesidades específicas pueden llevar a la elección incorrecta de aspersores inadecuados para las condiciones del altiplano, lo que resulta en una distribución desigual del agua, desperdicio de recursos hídricos y baja eficiencia en el riego.

Los productores pueden carecer de recursos económicos y oportunidades para aprender sobre las tecnologías y prácticas más actualizadas en el campo del riego. Esto limita su capacidad para mejorar y aprovechar al máximo los beneficios que los aspersores de riego

## **1.3. Justificación**

El riego desempeñará un papel aún más importante en la seguridad alimentaria en los próximos años. Es crucial mejorar y consolidar el riego, teniendo en cuenta no solo los aspectos técnicos, sino también las necesidades económicas, sociales y medioambientales cada vez más exigentes de la sociedad. Una alternativa para mejorar el riego es el sistema de riego por aspersión, que ha contribuido significativamente a la producción de diferentes cultivos.

Se realizó evaluaciones técnicas en condiciones de altiplano con el uso de aspersores comerciales de baja presión Xcel Wobbler y 423 AG, con la finalidad de obtener resultados de eficiencia de riego, uniformidad de riego y funcionamiento técnico del aspersor para satisfacer los requerimientos del productor. Esto permitirá tomar decisiones informadas sobre la adaptabilidad al terreno, el ahorro de energía, los costos de operación y los resultados de rendimiento, lo que a su vez contribuirá a una gestión más eficiente y rentable de los recursos agrícolas en áreas de altitud elevada.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

- Realizar la evaluación técnica de dos aspersores comerciales para riego agrícola, con mecanismos de giro de tipo “reacción” e “impacto”, en la Estación Experimental de Kallutaca.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Determinar el comportamiento Hidráulico de los aspersores comerciales con mecanismo de giro por reacción (Xcel Wobbler) y el aspersor con mecanismo de giro por impacto (423 AG).
- Analizar el desempeño de riego de aspersores de reacción (Xcel Wobbler), y aspersores de impacto (423 AG), mediante los principales parámetros de evaluación de riego.
- Simular el desempeño de riego parcelario, con diferentes espaciamientos entre laterales y aspersores de riego.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Normativa en el sector riego**

Según la (Constitucion Política del Estado Plurinacional) indica lo siguiente:

Ley 2878 del 2 de agosto del 2006.

#### **- Ley de riego 2878**

Art. 1.- La presente ley tiene por objeto establecer las normas que regulan el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos en las actividades de riego para la producción agropecuaria y forestal, su política, el marco institucional, regulatorio y de gestión de riego, otorgado y reconociendo derechos, estableciendo obligaciones y procedimientos para la resolución de conflictos, garantizando la seguridad de las inversiones comunitarias, familiares públicas y privadas.

### **2.2. El riego**

Faci y Playan (1996), mencionan que el objetivo primordial del riego es suministrar al cultivo el agua adicional a la precipitación para su crecimiento óptimo y cubrir las necesidades de lavado de sales para evitar su acumulación en el perfil del suelo, asegurando la sostenibilidad del regadío.

Según Montero (2000), afirma que el regadío es una actividad técnica socioeconómica y medio ambiental encaminada a garantizar la producción de alimentos y materias primas de origen vegetal. Al mismo tiempo el regadío es una de las acciones del hombre que influye sobre la biosfera, ya que incide de manera notable sobre sus elementos principales: suelo, el agua y la atmósfera, así como sobre sus especies vegetales y animales.

#### **2.2.1. Riego agrícola**

Martinez (2014), expresa que las plantas necesitan agua de forma constante y las precipitaciones se producen de manera irregular, en algunos casos es necesario suministrar a las plantas agua artificialmente para su buen desarrollo o para aumentar su producción. Por tanto, se puede definir el riego agrícola como el aporte artificial de agua a las plantas con el fin de suministrar la humedad necesaria para su desarrollo o de aumentar su producción, de forma complementaria al aporte de las precipitaciones.

### 2.3. Métodos de riego tecnificado

Según Cisneros (2003), los métodos de riego tecnificado pueden ser considerados como la forma en que el riego es aplicado al suelo para el desarrollo de los cultivos, estos pueden ser:

- **Riego superficial.** El agua se distribuye por la superficie del campo por gravedad, esto es, a través de surcos, melgas cuadros, terrazas, etc.
- **Riego por aspersión.** El agua se distribuye en forma de lluvia artificial a través de un equipo especial de rociado.
- **Riego por goteo.** El agua se suministra en forma de gotas directamente a la zona radicular de cada planta.

**Cuadro 1. Ventajas e inconvenientes de los principales sistemas de riego**

	<b>Riego por superficie</b>	<b>Riego por aspersión</b>	<b>Riego por goteo</b>
Costo de inversión	Bajo en terreno plano	Elevado	Elevado
Necesidades energéticas	Bajo o nulo	Mediano a elevado	Bajo
Nivel técnico necesario para la operación y mantenimiento	Bajo	Mediano	Elevado
Carga de trabajo para la operación	Elevado	Bajo a mediano	Bajo
Eficiencia de riego	Bajo	Mediano a elevado	Elevado
Costo de riego (por hora de trabajo)	Bajo a mediano	Mediano a elevado	Elevado
Comentarios	No conviene en terrenos arenosos o accidentados	Posibles problemas fitosanitarios	Conveniente para cultivos de alto valor agregado o con aguas salinas

Fuente: Carrazon (2007)

### **2.3.1. Riego localizado**

Fernandes y Gonzales (2014), sostienen que, los sistemas localizados de riego consisten en suministrar el agua de modo que sólo moje una parte del suelo de cultivo, aquel donde se desarrollan las raíces. Además de la aplicación de agua al suelo, este sistema posibilita el aporte de los fertilizantes necesarios. Es aconsejable el suministro frecuente de agua, y en cantidades relativamente pequeñas, es decir, que el número de riegos en una campaña pueda ser elevado aportando cada vez una cantidad de agua y fertilizantes relativamente pequeña.

Universidad de Sevilla (2008), señala que el riego localizado incluye:

**Riego por goteo.** El agua se aplica mediante dispositivos que la echan gota a gota o mediante flujo continuo, con un caudal inferior a 16 litros/hora por punto de emisión o por metro lineal de manguera de goteo.

**Riego por microaspersión.** El agua se aplica mediante dispositivos que la echan en forma de lluvia fina, con caudales comprendidos entre 16 y 200 litros/hora por punto de emisión.

### **2.3.2. Riego por aspersión**

Peralta y Simpfendörfer (2001), indican que el riego por aspersión consiste en aplicar el agua al suelo simulando una lluvia. Este efecto es conseguido gracias a la presión en que fluye el agua dentro de un sistema de tuberías y es expulsada al exterior a través de las boquillas de un aspersor. Normalmente, la presión requerida se obtiene a partir de bombas hidráulicas las cuales aspiran el agua desde un canal, río o pozo. Sin embargo, el sistema también puede operar sin bombas cuando la fuente de agua se encuentra en una posición más elevada que el terreno a regar.

#### **2.3.2.1. Ventajas y desventajas del riego por aspersión**

Diaconia (2011), señala que entre las principales ventajas del riego por aspersión se tiene:

- La dosis de riego es solo función del tiempo de cada riego, puede adaptarse tanto a dosis grandes como pequeñas.

- Al poder modificarse fácilmente la pluviometría, es capaz de adaptarse a terrenos muy permeables (más de 30 mm h<sup>-1</sup>) o muy impermeables, e incluso a terrenos con características heterogéneas.
- Su instalación no necesita nivelaciones, adaptándose a topografías onduladas, lo que permite conservar la fertilidad natural del suelo.
- Se adapta a la rotación de cultivos y a los riegos de socorro. En el primer caso, siempre que se dé dimensiones para el cultivo más exigente. Dada la eventualidad de los riegos de socorro los sistemas que mejor se adaptan son los móviles o semifijos.
- Dosifica de forma rigurosa los riegos ligeros, lo cual es importante en la etapa inicial de la planta por la posibilidad de ahorrar agua, de ahí que se recomiende la aspersión, cuando la dosis de riego sea inferior a 40 milímetros.
- Pueden conseguirse altos grados de automatización, con el consiguiente ahorro de mano de obra a costa normalmente de una mayor inversión.
- En algunas modalidades permite el reparto de fertilizantes y tratamientos fitosanitarios, así como la lucha anti helada.
- Evita la construcción de acequias y canales, aumentando la superficie útil a la vez que es más cómodo y de más fácil manejo que el riego por superficie.
- Los sistemas móviles o semifijos requieren menos inversión, pero no pueden adaptarse al riego en bloques que consiguen mayor uniformidad y eficiencia de riego, ni a los riegos de alta frecuencia.
- Disminuye el efecto de las heladas.

Entre las principales desventajas se pueden mencionar:

- El posible efecto de la aspersión sobre plagas y enfermedades.
- Interferencias sobre los tratamientos, por el lavado de los productos fitosanitarios que protegen la parte aérea del cultivo. Es preciso establecer la programación de riegos adecuada para evitar estas interferencias.
- Pueden originar problemas de salinidad en la parte aérea del cultivo cuando se utilicen aguas salinas o residuales para regar, ya que al evaporarse aumenta la concentración de sales o las impurezas de la misma.
- Mala uniformidad en el reparto debido a la acción de los vientos.

- Los principales problemas suelen ser de carácter económico por las altas inversiones iniciales y los elevados costes de mantenimiento y funcionamiento (energía).
- Alto costo de instalación inicial.
- Facilita la proliferación de malezas.
- Elevado consumo de energía.

### 2.3.2.2. Componentes básicos de un sistema de riego por aspersión

Existen muchas variantes tecnológicas de sistemas de riego por aspersión, lo que permite su adaptación a una gran variedad de condiciones socioeconómicas y de características de suelo y de cultivos (Pereira, 2004).

Todos los sistemas tienen común los siguientes componentes básicos:

- **Bomba:** Accionada por un motor de combustión o eléctrico, que tiene la función de elevar el agua a partir de su origen, una balsa, un pozo o un río, y alimenta el sistema de riego con la presión necesaria para el funcionamiento de los aspersores.
- **Tuberías:** La tubería principal conduce el agua desde la bomba a las tuberías secundarias, y de éstas a los ramales. En la mayoría de los casos, la tubería principal es fija, instalada sobre el suelo o, más generalmente, enterrada. En otros casos es desplazable, pudiendo ser trasladada de parcela a parcela. Las tuberías fijas pueden ser de acero galvanizado, de fibrocemento o de plástico de alta densidad.
- **Los ramales o laterales:** Son las tuberías donde se montan los aspersores, pueden ser fijos (en este caso, van generalmente enterrados), desplazables o móviles.
- **Aspersores:** Son los dispositivos que aplican el agua sobre el suelo y los cultivos en forma de gotas pequeñas, imitando la lluvia.

### 2.3.2.3. Aspersores empleados en el riego

Alonso (2010b), clasifica a los aspersores de riego por aspersión en dos grupos generales:

- a) **Aspersor estacionario que permanecen en la misma posición mientras dura el riego**



**Figura 1. Sistema de riego estacionario**

Fuente: (Ministerio de Agricultura)

- **Aspersores de impacto o de brazo oscilante.** El chorro golpea intermitentemente un brazo oscilante el cual origina un movimiento discontinuo del aspersor. El brazo recupera su posición inicial por medio de muelles o contrapesos.



**Figura 2. Aspersor de impacto**

Fuente: (NDI, 2015)

- Aspersores sectoriales que tiene un dispositivo que limita el área regada, y se usan en las lindes para evitar el riego de zonas fuera de la parcela, tiene un mecanismo que limita el ángulo de giro del aspersor.



**Figura 3. Aspersor sectorial**

Fuente: (Agroforestal, 2022)

- Suelen arrojar un caudal inferior de 1100 lt/hr, producen un riego muy uniforme, aun en condiciones de viento, pero requieren un espaciamiento entre aspersores inferior a 12 m.



**Figura 4. Aspersor rotatorio de baja presión**

Fuente: (Senninger, 2012)

- Arrojan un caudal entre 1000 y 6000 lt/hr y se emplean en espaciamientos entre 12 y 24 m.



**Figura 5. Aspersor de media presión**

Fuente: (Agroforestal, 2022)

- Son los llamados cañones de riego, capaces de arrojar 200 m<sup>3</sup>/hr.



**Figura 6. Aspersor tipo cañón de alta presión**

Fuente: (NDI, 2015)

### **b) Pivote Central**

Chipana (2006), indica que este es un sistema de riego por aspersión, que opera en círculo a una velocidad constante. Es recomendable para el riego de grandes superficies y disminuye sustancialmente la mano de obra. El agua llega a la base del pivote (centro del círculo) a través de tuberías y un conjunto motobomba. La tubería que sale de la base del pivote es mantenida a una altura de 2,7 m (opcional 3,7 m). Por torres equipadas con ruedas distanciadas entre sí, de 35 a 40 m. los aspersores o difusores son colocados en las tuberías que sostienen las torres. Las torres están equipadas con un motor de 1 CV lo que permite que el conjunto gire alrededor del pivote. Con este tipo de sistemas se pueden regar entre 40 a 120 ha.

#### **2.3.2.3.1. Tipos de aspersores**

La Universidad de Sevilla (2008), indica que los aspersores son los elementos de la instalación de riego por aspersión encargados de distribuir el agua en forma de lluvia sobre la superficie del suelo. El movimiento del aspersor es provocado por la presión del agua que, al salir, se dispersa en forma de gotas mojando una superficie más o menos circular, cuyo alcance depende de la presión del agua y del tipo de aspersor, por tanto, la distribución del agua sobre la superficie regada por un aspersor no es uniforme, por lo que para conseguir la mayor uniformidad posible han de disponerse los aspersores lo suficientemente próximos entre sí de tal forma que se produzca un solape entre ellos.

Los aspersores son el componente más importante de un sistema de riego por aspersión; son los que determinan la eficacia y la eficiencia de todo el sistema. Un aspersor funciona forzando el agua bajo presión a pasar a través de un orificio circular, el pico o la boquilla, para la atmosfera. El aspersor gira en la posición horizontal y produce un modelo de distribución circular, sin embargo, los aspersores pueden poseer los dispositivos que permiten regar solamente una fracción del círculo. La distancia del aspersor a la circunferencia exterior del círculo mojado se llama alcance. Los aspersores rotativos, cuando trabajan satisfactoriamente, deben distribuir las gotas de forma uniforme y proporcionar un tamaño de las mismas adecuado (Pereira, 2004).

El mercado oferta una variedad de aspersores, entre los cuales se encuentran los aspersores rotatorios, como los más utilizados para el riego, sin embargo, entre estos también se distinguen diferentes modelos y características en base a sus especificaciones

técnicas de funcionamiento. Entre las principales características hidráulicas se tiene: la presión de trabajo, el caudal de servicio, el radio de alcance del chorro y el diámetro de las boquillas bajo determinado ángulo de elevación (Serrano, 2012)

Jimenez y Delgadillo (2006), señalan que en general, los diferentes tipos de aspersores pueden agruparse de acuerdo a las siguientes características:

- **Según la velocidad de giro:**

- **De giro rápido:** mayor a 6 vueltas/min. De uso en jardinería, viveros, etc.

- **De giro lento:** de 1/4 a 3 vueltas/min. De uso general en agricultura.

Para una misma presión los de giro lento consiguen mayor alcance que los de giro rápido, permitiendo espaciar más los aspersores.

- **Según el mecanismo de giro:**

- **De reacción:** La inclinación del orificio de salida origina un par, que mueve el conjunto.

- **De turbina:** El chorro incide sobre una turbina que origina el giro.

- **De impacto:** El chorro incide sobre un brazo con un muelle, que hace girar el aspersor de forma intermitente. Una vez que el brazo es desplazado, éste recupera su posición por la acción de un resorte o un contrapeso. En cada golpe, el aspersor gira un ángulo comprendido entre 3 y 5°.

- **Según la presión de trabajo:**

Según el INIA (2001), los aspersores se clasifican de acuerdo a la presión de trabajo, como sigue:

- **Baja presión:** Funcionan con presiones inferiores a 20 metros de columna de agua (m.c.a). Utilizan caudales inferiores a 0.3 l/s, y su radio de mojadura es menor a 9 metros. Producen un riego uniforme aún en el caso de viento de cierta consideración. Son utilizados en jardinería, hortalizas, riego de frutales por debajo de la copa de los árboles y riego de protección de heladas.

- **Media presión:** Funcionan con presiones comprendidas entre 20 y 45 m.c.a. Los caudales utilizados con estos aspersores varían entre 0,3 y 1,5 l/s. y su radio de mojadura fluctúa entre 10 y 20 metros. Producen un riego uniforme y son utilizados en una gran variedad de suelos y cultivos.

- **Alta presión:** Funcionan con presiones superiores a 45 m.c.a. y arrojan un caudal superior a 1,5 l/s con radios de mojadura entre 30 y 75 metros. Dentro de esta categoría se sitúan los cañones de riego, los cuales tienen un elevado costo, tanto en el de la inversión inicial, como en su funcionamiento. La distribución del agua es muy afectada por el viento y producen gotas muy grandes que perjudican con su impacto a determinados suelos y cultivos. Se usan para cubrir grandes extensiones, generalmente praderas, donde no producen daños al cultivo.

#### **2.3.2.3.2. Selección del aspersor**

La selección del aspersor más adecuado para cada situación envuelve el conocimiento de las características de funcionamiento como del espaciamiento (Chipana, 2006).

Se debe tomar en cuenta los siguientes factores:

- **Boquilla:** Normalmente los aspersores presentan 1, 2 o 3 boquillas con un diámetro que varía desde 1/16" a 2". La boquilla tiene un papel muy importante en el desempeño del aspersor.
- **Presión:** El caudal del aspersor está en directa relación con el diámetro de la boquilla y la presión de servicio. Una pulverización muy alta ocasiona que el agua se pulverice mucho lo que provocará que exista mayor distribución de agua alrededor del aspersor y el alcance del chorro será menor. Cuando la presión esta debajo de los límites recomendados, la pulverización será inadecuada, proporcionando una mayor distribución de agua en las extremidades del área mojada. Los fabricantes proporcionan catálogos recomendando los límites óptimos de presión y diámetro de boquilla para cada modelo
- **Viento:** La acción del viento afecta la distribución del agua por el aspersor, afectando de sobremanera la uniformidad de riego, que depende de la velocidad del viento y del tamaño de las gotas de agua. Cuanto mayor la velocidad del viento y menor el tamaño de las gotas, mayor será la distorsión de la distribución. En general

cuando las velocidades del viento son mayores a 3,0 m-s ya comienzan a existir dificultades.

- **Distancia entre aspersores (Es) y laterales (El):** Para que exista una adecuada distribución del agua en el terreno, debe ocurrir un solapamiento entre el área mojada por los aspersores. Para ello los aspersores deben estar distanciados entre sí a una longitud de 0,4 – 0,65 del diámetro de mojado lo que para regiones áridas y semiáridas se recomienda que (Es) debe estar entre 0,4 a 0,5 del diámetro de mojado. En relación a la distancia entre laterales (El), este es condicionado por los mismos factores que Es, por lo que se recomiendan espaciamientos variando entre 0,4 a 0,7 del diámetro de mojado. Una buena práctica para atenuar los efectos del viento es ubicar los laterales en forma perpendicular a la dirección predominante del viento.

#### **2.3.2.4. Diseño de riego por aspersión**

El INIA (2001), indica que el diseño de riego por aspersión incluye uno agronómico y uno hidráulico. Por otro lado, el diseño hidráulico corresponde al cálculo de los diámetros de tuberías requeridos para que el sistema funcione, cumpliendo ciertos requisitos mínimos establecidos y a la selección del equipo de bombeo, si este fuera necesario.

##### **2.3.2.4.1. Diseño agronómico**

INTA (2009), define al diseño agronómico, como el proceso que ha de garantizar que la instalación sea capaz de suministrar, con una óptima eficiencia de aplicación, las necesidades hídricas del cultivo durante el período de máximo consumo, humedeciendo el volumen de suelo necesario para su desarrollo. El diseño agronómico se compone de dos fases: a) Cálculo de las necesidades de agua de las plantas, b) Determinación de la dosis, frecuencia y tiempo de riego.

INIA (2001), señala que el diseño agronómico corresponde a la determinación de: la evapotranspiración, lámina de reposición, velocidad de infiltración básica, frecuencia de riego y superficie mínima de riego diario, selección del modelo de aspersor y disposición de los mismos en el campo, número de laterales necesarios para cumplir el programa de riego, determinación de caudales requerido.

#### **2.3.2.4.2. Diseño Hidráulico**

Sobre la base del diseño agronómico se procede a efectuar el diseño hidráulico, que consiste en determinar con la mayor precisión posible, las características del equipo de riego, que pueda entregar el caudal y la presión necesaria, para el sistema, en las condiciones que exige el diseño agronómico, en si una vez definido el diseño agronómico, se procede a realizar el diseño hidráulico, que consiste en determinar los diámetros de las tuberías laterales, secundarias, principales y de conducción, las presiones requeridas y la selección de la clase de tubería (INTA, 2009).

Moya (2009), indica que el diseño hidráulico comprende todos los cálculos de los diferentes componentes de la instalación, para que se adapten a las condiciones de presión nominal y caudal nominal de los mismos, buscando la solución más económica dentro de unas calidades garantizadas. Con el diseño hidráulico se determinarán las dimensiones de todos los componentes de la instalación de riego, de forma que se pueda aplicar el agua suficiente para los cultivos durante cualquiera de sus fases de desarrollo; otro objetivo es conseguir que la aplicación del agua en forma de lluvia sobre el suelo sea suficientemente uniforme. Con todo ello se podrán obtener buenas producciones con el menor gasto de agua.

Moya (2009), así mismo señala que es preciso, hacer una importante anotación: el valor de uniformidad de aplicación que se utilizara en el proceso de diseño hay que elegirlo previamente. Hay que tener en cuenta que, optando por una uniformidad alta, se estará eligiendo una instalación de riego que ahorrara agua e incrementar la producción de los cultivos, lo que siempre es necesario. Pero también será mayor al coste de la instalación ya que las presiones deberán ser más uniformes, mayores los diámetros de tuberías, se necesitarán mayor longitud de tuberías, serán necesarios reguladores de presión, etc.

#### **2.4. Evaluación del riego por aspersión**

Salvatierra (2019), afirma que, para lograr un sistema de riego eficiente, es necesario comprender el comportamiento del agua durante el riego y las variables que influyen en este proceso. Esta comprensión nos permitirá diseñar sistemas que sean altamente eficientes en la entrega del agua al cultivo, minimizando las pérdidas. Al hacerlo, podemos maximizar el aprovechamiento de los recursos hídricos y energéticos, y promover un uso sostenible del agua en la agricultura.

MINAGRI (2014), menciona que se debe tener en cuenta que regar en exceso puede ser perjudicial tanto para el suelo como para el cultivo, además de afectar a otros usuarios del sistema. Por otro lado, regar de manera insuficiente puede disminuir los rendimientos de la cosecha. Para lograr un riego adecuado, cada agricultor debe verificar las condiciones de funcionamiento de su equipo de riego a través de pruebas de campo. De la misma forma el mismo autor señala que el sistema de riego puede ser operada por la esposa o los hijos del agricultor sin necesidad de realizar grandes esfuerzos. Ellos deben realizar los ajustes necesarios en función del área cubierta por el aspersor y los parámetros de riego específicos para cada parcela. Idealmente, cada sistema de riego por aspersión debería contar con una programación recomendada por expertos en la materia para los cultivos de la zona. Esta programación indicará la cantidad de agua en milímetros o litros por metro cuadrado que el usuario debe aplicar en cada riego.

Fernandez *et al.* (2010), mencionan que la cantidad de agua que se infiltra dependerá de las características físicas del suelo y del funcionamiento de los aspersores. En un sistema de riego por aspersión bien diseñado, no debe haber escorrentía, lo que significa que cada gota de agua debe infiltrarse en el mismo lugar donde cae. Además, es importante que el tamaño de las gotas producidas por los aspersores no provoque erosión al impactar contra el suelo.

Es necesario controlar el tamaño de las gotas, ya que, a mayor tamaño, mayor será la energía con la que llegan al suelo, lo que podría causar erosión.

#### **2.4.1. Parámetros y conceptos de la evaluación de riego por aspersión**

##### **2.4.1.1. Uniformidad de distribución (UD)**

Tarjuelo (2005) indica que la UD es un término útil para poner un valor numérico de la uniformidad de aplicación para sistemas de riego agrícolas. Según Delgadillo *et al.* (2011) mencionan que la UD indica la uniformidad de aplicación a lo largo del campo e indica la magnitud de los problemas en el proceso de aplicación del agua.

Existen varios factores que influyen en la uniformidad de un riego, pero en general se puede afirmar que el riego por goteo logra la distribución más uniforme del agua, seguido por el riego por aspersión y en último lugar los riegos manuales o por gravedad.

Dudek y Fernandez (s,f), si la disponibilidad de agua en el suelo es baja, algunas plantas recibirán menos riego de lo necesario, mientras que otras recibirán más riego de lo necesario. Esto resultará en un crecimiento deficiente de las plantas y un aumento en la presencia de plagas. Una clasificación de la UD propuesta por estos autores se muestra en el cuadro 2.

**Cuadro 2. Clasificación de la Uniformidad de Distribución**

<b>%UD</b>	<b>Clasificación</b>
<77%	Muy pobre
77% - 82%	Pobre
83% - 90%	Aceptable
>90%	Excelente

Fuente: Dudek y Fernandez (s,f)

Según Serrano (2014), la uniformidad de distribución se define de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$\%UD = \frac{\text{Lamina de agua promedio infiltrada(o recibida)en el cuarto inferior}}{\text{Lamina de agua promedio infiltrada}} * 100 \quad (\text{Ec.1})$$

#### 2.4.1.2. Coeficiente de uniformidad (CU)

Un indicador muy asociado y empleado para evaluar la uniformidad del riego por aspersión es el coeficiente de Uniformidad creado por Christiansen en 1942 se usa para medir la uniformidad de la pluviometría dada por un aspersor o sistemas de aspersores. expresado en porcentaje por (Serrano, 2014).

$$Cu = \left[ 1 - \frac{\sum(Hi-H)}{Hi} \right] * 100 \quad (\text{Ec.2})$$

**Donde:** CU: Coeficiente de Uniformidad (%); Hi: Altura de riego aplicada (mm); H: Lamina media (mm).

**Cuadro 3. Rango de coeficiente de uniformidad**

<b>Clasificación</b>	<b>Coeficiente de Uniformidad (CU)%</b>
Excelente	90 - 100 %
Buena	80 - 90 %
Aceptable	70 - 80 %
Inaceptable	-70%

Fuente: Servicio de Asesoramiento Regante (2010)

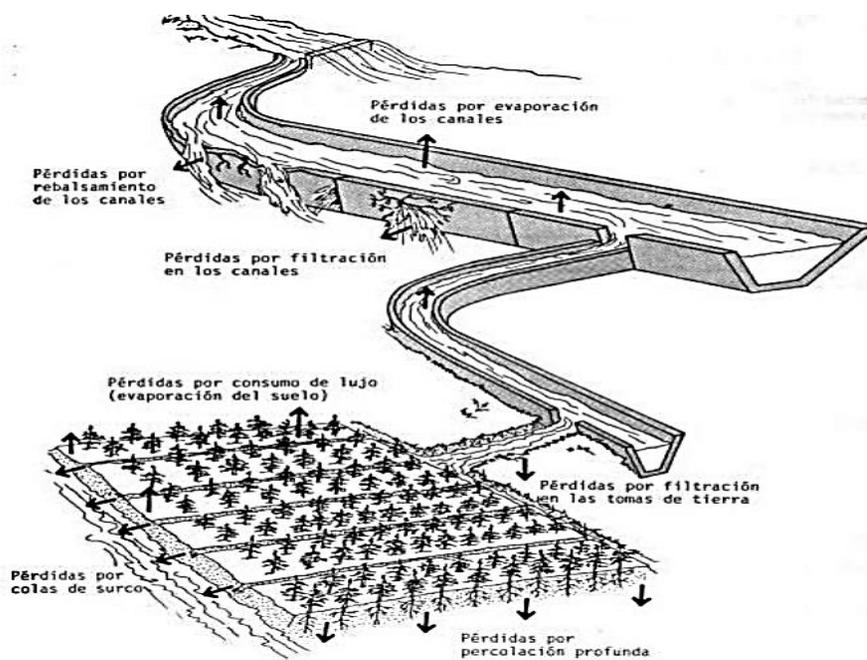
Es recomendable que el rango nunca sea menor que un 90% de uniformidad. Con rangos menores a éste, es necesario realizar un levantamiento de información del sistema de riego para poder detectar sus fallas (Humeres *et al.*, 2020).

#### **2.4.1.3. Eficiencia de riego**

Jimenez y Delgadillo (2006), indican que el riego en la parcela y su manejo requieren ser medidos para determinar la eficiencia potencial de cómo ha sido diseñada. Para que todas las comparaciones tengan una base común, los parámetros de desempeño (eficiencia de aplicación potencial, la eficiencia de aplicación real, la eficiencia de almacenamiento y la uniformidad de distribución) están basados en la lámina promedio de agua infiltrada o almacenada en la cuarta parte del área que recibe la menor cantidad de agua.

Serrano (2012) citado por Poma (2014), señala que la eficiencia de riego se define (despreciando los cambios en el almacenamiento del agua de riego dentro de las fronteras), según la relación:

$$\%ER = \frac{\text{Agua de riego usada beneficiosamente}}{\text{Agua de riego aplicada}} \times 100 \quad (\text{Ec.3})$$



**Figura 7. Eficiencia del sistema de riego**

Fuente: (MINAGRI, 2015)

#### 2.4.1.4. Eficiencia de aplicación (Ea)

MINAGRI (2015), define a la eficiencia de aplicación de riego como la cantidad de agua útil para el cultivo que queda en el suelo después de un riego, en relación al total del agua que se aplicó. Generalmente se mide en porcentaje o litros de agua útil en el suelo por cada 100 litros aplicados.

Serrano (2014), menciona que, para alcanzar la lámina requerida en un simple evento de riego, se utiliza como indicador de calidad en pequeñas unidades de riego, considerando uniforme el requerimiento en toda la superficie y se define según la ecuación.

$$EA = \frac{\text{Lamina promedio de agua infiltrada y almacenada en el } Ci}{\text{Lamina promedio de agua aplicada}} * 100 \quad (\text{Ec.4})$$

Adena (2005) citado por Guarachi (2013), señala que las pérdidas ocurren en diferentes momentos, pudiendo clasificarse en los siguientes grupos:

**Pérdidas de transporte:** Son las que ocurren en las conducciones, desde las fugas en tuberías y canales hasta la evaporación en el caso de las conducciones abiertas.

**Pérdidas de aplicación:** Engloba la instalación dentro de la parcela de riego también las fugas de tuberías como la evaporación que, bajo condiciones de viento y altas temperaturas, tiene lugar en el chorro de los emisores.

**Pérdidas en el suelo:** Una vez en el suelo, el agua puede escurrir al superarse su capacidad de infiltración o al encontrarse saturado.

**Cuadro 4. Eficiencia de aplicación según método de riego**

<b>Método de riego</b>	<b>Eficiencia</b>
Surcos rectos	55 - 70 %
Surcos en contorno	50 - 55 %
Corrugación	50 - 70 %
Aspersión, clima seco y cálido	60 %
Aspersión, clima moderado	70 %
Aspersión, clima frío y húmedo	80 %

Fuente: Servicio de Asesoramiento Regante (2010)

#### 2.4.1.5. Eficiencia de distribución (EDa)

Se define la eficiencia de distribución del agua (EDa) para un cierto porcentaje (f) de área adecuadamente regada (aquella que recibe una determinada cantidad de agua prefijada o más) como:

$$EDa = \frac{Hr}{Hba} \quad (\text{Ec.5})$$

Serrano (2014) citado por Poma (2014), señala que los datos para obtener el CU siguen una distribución normal, recomiendan la relación desarrollada por R.G. Allen en 1987:

$$EDa = 100 + (606 - 24.9 * f + 0.349 * f^2 - 0.00186 * f^3) \times \left(1 - \frac{CU}{100}\right) \quad (\text{Ec.6})$$

Donde “f” es la fracción de la superficie adecuadamente regada, se expresa en %.

#### 2.4.1.6. Perdida por evaporación y arrastre por el viento (Pe)

Las pérdidas por evaporación en el aire dependen principalmente de la humedad ambiental, la temperatura del aire y del agua, la altura del emisor, el tamaño de las gotas y la velocidad

del viento. Las pérdidas por arrastre dependen de la velocidad del viento, del tamaño de las gotas y de la distancia que tengan que recorrer hasta llegar al suelo (Tarjuelo, 1999).

Las pérdidas por evaporación y arrastre del viento ( $P_e$ ) se calculan como la diferencia entre la lámina de agua aplicada por los aspersores ( $L_a$ ) y la lámina de agua recogida en los pluviómetros ( $L_p$ ):

$$P_e = 100 * \frac{L_a - L_p}{L_a} \quad (\text{Ec.7})$$

Para calcular la lámina de agua aplicada por los aspersores ( $L_a$ ) se medirá el caudal de cada aspersor que moja la zona evaluada, por tanto, llegando a obtener ( $L_a$ ), con la siguiente formula:

$$L_a(\text{mm}) = \frac{Qa(L/h)}{\text{Sup.zona ev.}(m^2)*60a} * T. \text{ ev. (min.)} \quad (\text{Ec.8})$$

En cuanto a la lámina de agua recogida por los pluviómetros ( $L_p$ ) se calcula mediante la siguiente formula:

$$L_p(\text{mm}) = \frac{\text{Volumen medio recogido (cm}^3\text{)}}{\text{Area de la embocadura de los vasos (cm}^2\text{)}} * 10 \quad (\text{Ec.9})$$

#### 2.4.1.7. Pérdidas por fugas en conducciones (Pd)

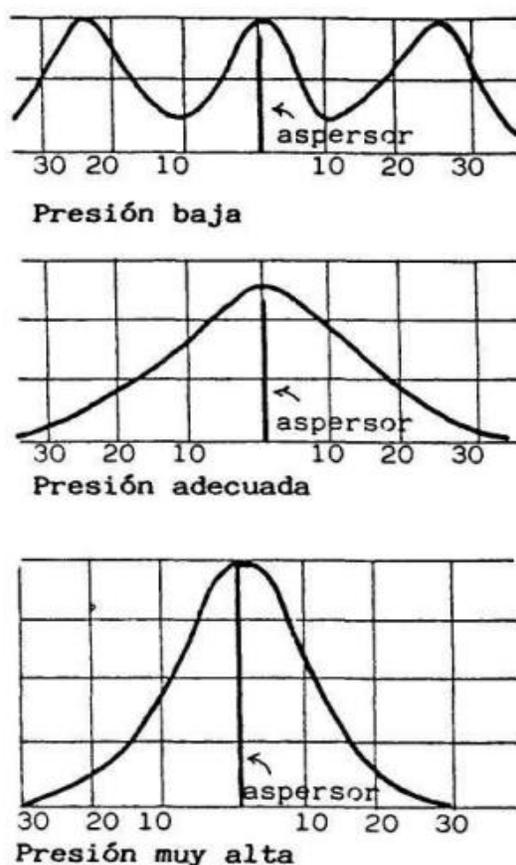
En sistemas con un adecuado mantenimiento, estas pérdidas pueden ser menores al 1% del caudal transportado, en cuyo caso la proporción entre el agua que descargan los aspersores y la bombeada ( $P_d$  de la anterior ecuación) estará entre  $0.99 < P_d < 1.0$ . En instalaciones con un mantenimiento insuficiente, estas pérdidas pueden superar el 10% ( $P_d = 0.99$ ), presentándose principalmente en los tubos porta aspersores y en los acoples (Serrano, 2014).

#### 2.4.2. Factores que afectan la eficiencia en riego por aspersión

INIA (2001), afirma que 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 es de gran importancia. 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.

Otro factor de gran importancia es la velocidad del viento, ya que provoca una deformación en el patrón de humedecimiento (Figura 8). Por esta situación es conveniente disminuir la distancia entre los aspersores para reducir dicho efecto.

La velocidad del viento aumenta a medida que aumenta la altura, por lo tanto, al diseñar el sistema, es recomendable colocar el aspersor lo más bajo posible, según la altura de los cultivos que se van a observar. El viento también influye en la elección del ángulo de dispersión de los aspersores, que generalmente se ajustan entre  $25^\circ$  y  $27^\circ$  en lugar de los  $45^\circ$  que serían ideales en ausencia de viento.

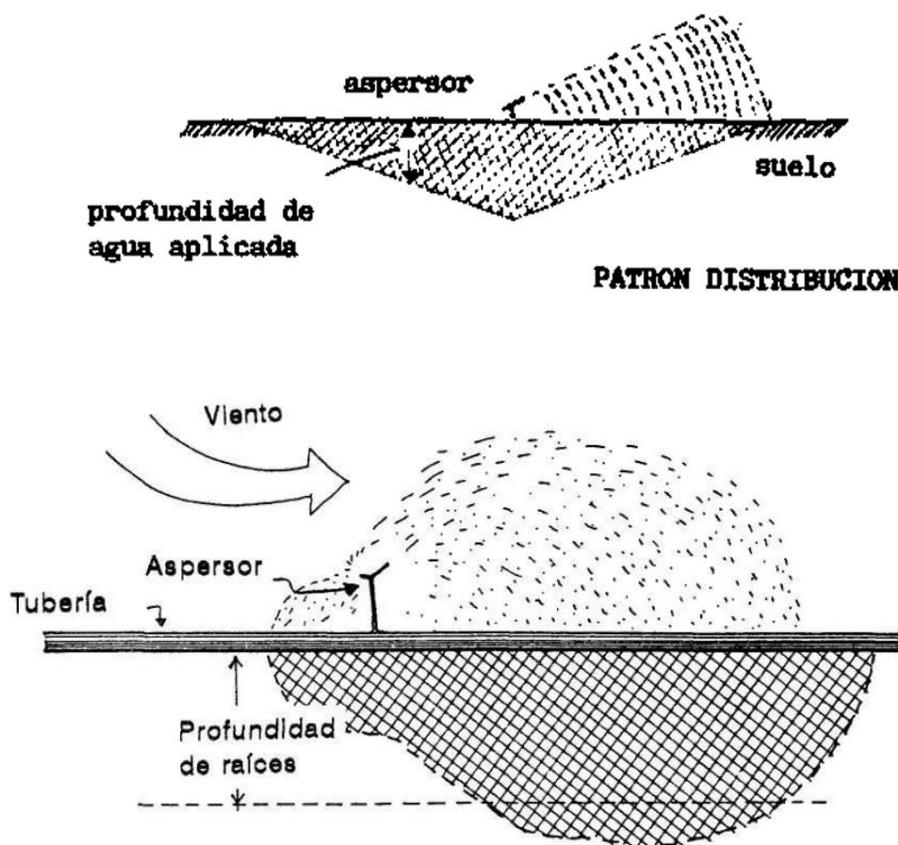


**Figura 8. Distribución del agua en función de la presión de trabajo de los aspersores**

Fuente: (INIA, 1994)

El viento afecta tanto a la uniformidad del reparto de agua como a las pérdidas por evaporación y arrastre, variables que determinan la eficiencia del riego. Pereira *et al.* (2010), mencionan que las condiciones que afectan tanto el diámetro de mojado como al modelo de la distribución de la precipitación del aspersor son la dirección y la velocidad del viento, la altura y el ángulo de elevación del chorro, la turbulencia del flujo de agua que entra y sale de la boquilla, la presión en la boquilla y el diámetro de la boquilla.

El límite de velocidad del viento por encima del cual no es aconsejable regar por aspersión varía en función del diseño en parcela de cada sistema de riego, según Faci y Bercero citados por Tarjuelo (2005), el límite general de velocidad del viento por encima del cual no resulta recomendable regar en riego por aspersión estacionario se sitúa entre 2,5 y 3,5 m s<sup>-1</sup>.



**Figura 9. Distribución de humedad bajo el aspersor y el efecto del viento**

Fuente: (INIA, 1994)

#### **2.4.2.1. Modelo de reparto de agua del aspersor**

Respecto al modelo de reparto del aspersor Tarjuelo (1999), señala que, la presión afecta de tal manera que cuando es demasiado baja, las gotas son demasiado grandes y la distribución es poco uniforme. Cuando la presión es demasiado alta, el agua se pulveriza en gotas muy finas y caen muy cerca del aspersor.

Los aspersores o difusores no pueden proporcionar un riego uniforme en toda el área mojada. Por lo general, la cantidad de agua aplicada durante el riego es mayor cerca del aspersor, lo que puede causar una distribución desigual del agua. Para lograr una aplicación uniforme, es necesario colocar varios aspersores cerca de unos de otros, de manera que se superpongan sus patrones de riego. En el caso de los aspersores de impacto, se considera que se logra una buena uniformidad cuando hay un solape de aproximadamente el 65% del diámetro del área mojada por cada aspersor.

Es posible mejorar la uniformidad del riego al colocar los aspersores más cerca entre sí, pero esto conlleva un mayor consumo de agua, un mayor número de aspersores y, por lo tanto, un mayor costo del sistema (Pereira, 2004).

#### **2.5. Simulación de riego por aspersión**

Excel, es una herramienta que permite modelar y simular diversos escenarios con gran flexibilidad. A partir de la información sobre los niveles de precipitación, patrones climáticos, tipos de cultivos y prácticas de riego, se ha diseñado un modelo en Excel que permite generar una serie de valores estimados que representan los diferentes espaciamientos de aspersores de riego. Este modelo tiene en cuenta múltiples parámetros, como las tasas de evapotranspiración, las necesidades hídricas, la eficiencia de los sistemas de riego, entre otros. Mediante el uso de fórmulas y funciones avanzadas de Excel, se ha podido simular diferentes escenarios y generar datos realistas que reflejan la dinámica del riego, que permitirán la planificación relacionada con el manejo del agua y los requerimientos de riego.

En cuanto Surfer es un software completo para visualizar en 3D, crear isolíneas y modelar superficies que se utiliza en Microsoft Windows. Es ampliamente utilizado para modelar el terreno en 3D, el análisis de superficies, la cartografía de curvas de nivel, la cartografía de superficies en 3D. Casi todos los aspectos de los mapas se pueden personalizar para obtener la presentación exacta (Geosoluciones, 2009).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Localización

##### 3.1.1. Ubicación Geográfica

El presente trabajo se realizó en el departamento de La Paz, en los predios de la Estación Experimental de Kallutaca, situada al Oeste de la ciudad de El Alto, en el municipio de Laja, provincia Los Andes. Geográficamente se sitúa a  $16^{\circ} 31' 28''$  Latitud Sud,  $68^{\circ} 18' 32''$  Longitud Oeste y a una altitud de 3901 m.s.n.m. La Estación Experimental se encuentra en la carretera La Paz-Desaguadero. Su distancia aproximada a la ciudad de La Paz es de 26 Km (Guarachi, 2013).

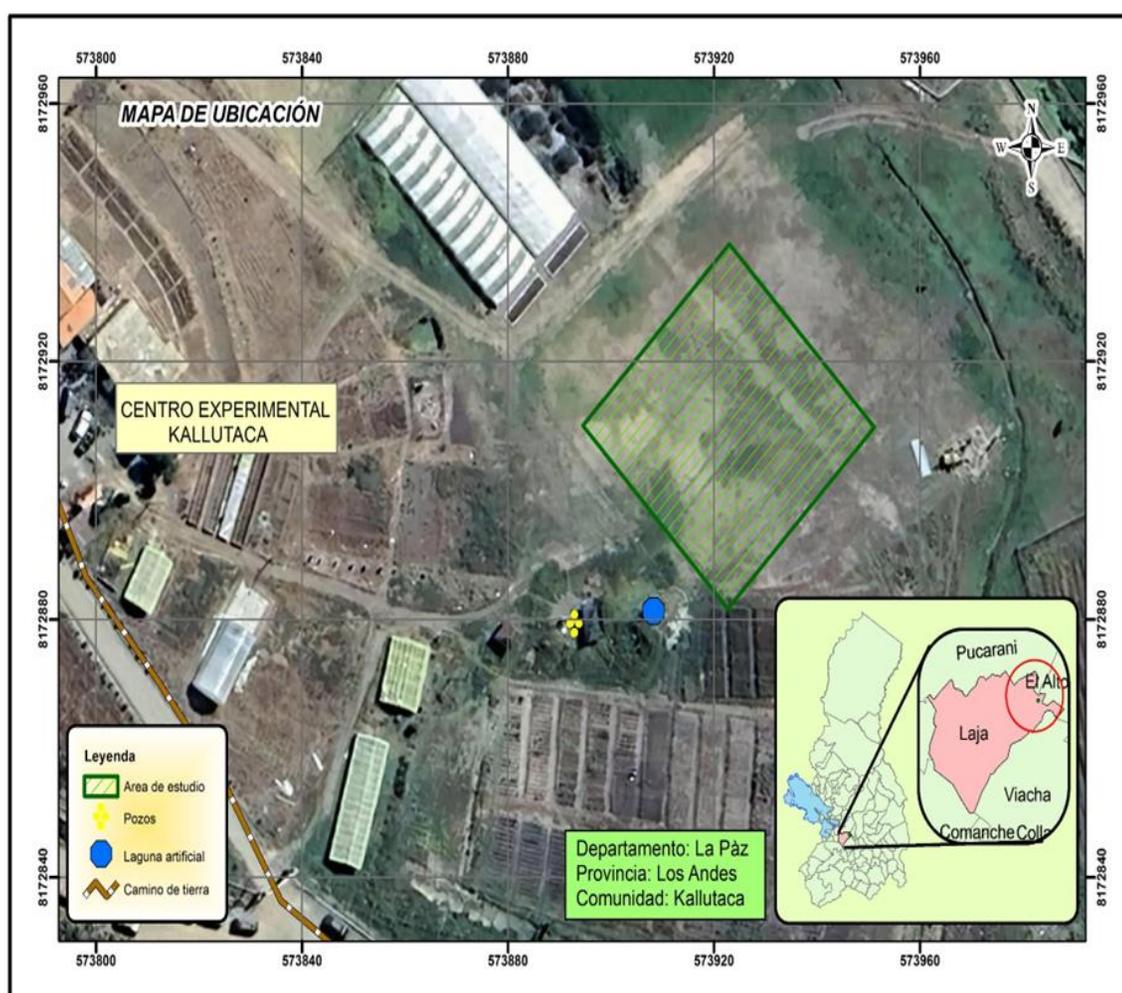


Figura 10. Ubicación del área de estudio

Fuente: Elaboración propia (ArcGIS)

### 3.1.2. Características Edafoclimáticas

#### 3.1.2.1. Clima

Las condiciones climáticas de la Estación Experimental de Kallutaca, corresponde a la clasificación del altiplano, seco y frío. La incidencia de helada se presenta en los meses de mayo hasta agosto, con una temperatura promedio anual 7.1°C, con masas de aire frío provenientes del Norte, que causan olas de frío principalmente en verano e invierno, a una velocidad de viento de 9.7 km/hr, con una precipitación pluvial que alcanzan a 613.1 mm por año, por los meses de septiembre hasta abril (Guarachi, 2011).

#### 3.1.2.2. Suelo

La sede Kallutaca de la UPEA presenta suelos en su mayoría superficiales de color pardo oscuro, textura franca se nota claramente la presencia de grava y piedras. Con origen tipo volcánica con erosión eólica e hídrico provocado por las lluvias característicos de sector del suelo altiplánico además con deficiencia de nitrógeno y fósforo y potasio que son notorios por ser seco en toda su dimensión, tiene suelos entre 5.5 a 7 de pH, y la humedad del suelo presenta 80 - 85%, (Quiape *et al.*, 2020).

#### 3.1.2.3. Flora

La vegetación del lugar se caracteriza por presentar comunidades vegetales nativas y cultivadas aptas para el consumo de los animales ya sea mono y poligástricos. Entre las especies de mayor presencia podemos citar los siguientes: Chilliguales gramadales conformados por: Ch'illiwa (*Festuca dolichophylla*), Festuca alta (*Festuca arundinacea*), Layu Layu (*Trifolium amabile*), *Erodium cicutarium* (Reloj reloj), *Lepidium bipinnatifidum* (Janu K'ara), *Capsella bursapastoris* (Bolsa de pastor), *Bromus inermis* (Cebadilla), *Brassica rapa* (Mostaza), *Setaria verticilla* (Cola de zorro), *Pennisetum clandestinum* (Ch'iji) y *Bidens andicola* (Muni muni).; Pasturas conformados por: Alfalfa (*Medicago sativa*), Pasto ovillo (*Dactylis glomerata*), Pasto llorón (*Eragrostis curvula*); también especies cultivadas como la Avena (*Avena sativa*), Cebada (*Hordium sativum*), Triticale (*X. Triticosecale*), (Guarachi, 2013).

#### **3.1.2.4. Fauna**

La composición de la fauna en este predio está compuesta generalmente por animales monogástricos y ruminantes en proporciones mínimas. Esto por la escasa alimentación que se produce en estos lugares ya sea forrajes y algunas resiembras que se hace en los pastizales del lugar.

### **3.2. Materiales**

#### **3.2.1. Material de estudio**

- Aspersor Senninger XcelWobbler
- Aspersor NDJ 423 AG

Los aspersores seleccionados fueron cuidadosamente elegidos, siendo estas también de alta calidad y diseñados para distribuir uniformemente el agua sobre el área de estudio.

#### **3.2.2. Material de escritorio**

- Bolígrafos, lápiz y goma
- Calculadora
- Papel bond (tamaño carta)
- Planillas de registro y un tablero
- Equipo ordenador para el procesamiento de datos

#### **3.2.3. Material para la instalación del riego por aspersión**

- Bomba de riego 2.5 HP WB20XT- HONDA
- Manguera de succión de 3 pulgadas
- Politubo de 1 y ½ pulgada
- Tubos HDPE de 32 mm

- Abrazaderas con reducción de  $\frac{3}{4}$  pulgada
- Tarrajas de 2, 1 y  $\frac{1}{2}$  pulgada
- Tee de plástico de  $\frac{3}{4}$  de pulgada
- Tapón macho de 1 pulgada
- Accesorios de acople PVC
- Llave stillson
- Sierra mecánica
- Alicates
- Desarmador estrella y plano
- Teflón

#### **3.2.4. Material para la evaluación del riego por aspersión**

- Pluviómetros caseros de tamaño uniforme con un diámetro interno de 18,8 cm y 19,2 cm de diámetro externo.
- Probetas graduadas de 250 y 1000 ml
- Cinta métrica
- Cronómetro de precisión
- Manómetros con glicerina con acoplamiento para aspersor
- Recipientes de volúmenes conocidos (baldes)
- Mangueras
- Cámara fotográfica y filmadora

### **3.2.5. Software para análisis de datos e información de campo**

- AutoCad
- Microsoft Office Excel
- Google Earth
- Surfer

### **3.3. Metodología**

#### **3.3.1. Fase de implementación de riego**

Para la fase de implementación de riego, se utilizaron tuberías de diferentes diámetros (2, 1 y ½ pulgada) y una variedad de accesorios para conectar las diferentes tuberías. Esto se hizo con el objetivo de distribuir el agua desde la unidad de bombeo hasta donde se encontraban los aspersores.

##### **3.3.1.1. Implementación unidad de bombeo**

La unidad de bombeo es responsable de proporcionar la presión necesaria para impulsar el agua a través de las tuberías y hacia los aspersores. Esta unidad puede estar compuesta por una bomba y un sistema de impulsión desde un depósito de agua, como un pozo, río o lago.

En el estudio mencionado, se utilizó una bomba de riego con un motor de combustión interna que funciona con gasolina. La marca de la bomba es WB20XT- HONDA, y tiene una boquilla de entrada y salida de 3 pulgadas. La potencia de esta bomba es de 2,5 HP.

##### **3.3.1.2. Apertura fuente de agua**

Como fuente de agua se habilitó un pozo con las siguientes dimensiones (5 m x 4.5 m x 3 m de profundidad), llegando a tener un volumen de 67.5 m<sup>3</sup> (Figura 11).



**Figura 11. Apertura de la fuente de agua**

### 3.3.1.3. Instalación red de tuberías

Las tuberías de riego por aspersión permiten conducir el agua a presión desde la unidad de bombeo hasta los aspersores.

Para la instalación de la tubería principal (TP), se empleó politubo de 1" y  $\frac{1}{2}$  con una longitud de aproximadamente 34 m. La cual condujo el agua desde la unidad de bombeo hasta los puntos de distribución que dividen los sectores de riego (tuberías secundarias).

Para la instalación de la tubería secundaria se utilizó HDPE de 32 mm que estuvo conformado por dos tuberías secundarias, derivadas a ambos extremos de la tubería principal, cada una con una longitud aproximado de 30 m. las cuales condujeron el agua desde la tubería principal hasta los puntos en que se derivan la distribución.

Por otra parte, la infraestructura de riego por aspersión se realizó de acuerdo al esquema presentado en la (Figura 12 y 13), utilizando un espaciamiento entre laterales y aspersores de: 9 m para el aspersor Xcel Wobbler y 14 m para el aspersor 423AG.

Los laterales de riego llevan insertos durante su trayecto los tubos portaaspersores, por lo tanto, constituyen los elementos finales de conducción y distribución. Por último, para los portaaspersores fueron empleados tuberías PVC de  $\frac{3}{4}$ " distribuidas a 9 y 14 m según el tipo de aspersor utilizado a lo largo del lateral.

Es importante destacar que antes de instalar los laterales y tubos portaaspersores, se llevaron a cabo pruebas diferentes según el catálogo de cada aspersor, Xcel Wobbler y 423

AG, para determinar el área aproximada de riego que cada aspersor a una presión específica. Además, se instalaron diversos equipos para evaluar los principales parámetros de riego, como manómetros de glicerina. Estos manómetros se colocaron al inicio de la tubería principal, al inicio de los laterales y entre la conexión de los tubos portaaspersores y los aspersores, con el objetivo de medir la presión generada durante la evaluación.

Se realizó una inspección de los componentes de la red de tuberías, juntas (coplas), elementos de control, etc. Posteriormente se comprobó si existían fugas en las juntas entre tubos de aspersión y otros elementos de la instalación.

Se armó una red de recipientes pluviométricos caseros formando una malla de 1 m x 1 m con una cantidad de 84 recipientes para evaluar el aspersor Xcel Wobbler y 169 recipientes para el aspersor 423AG.



**Figura 12. Instalación de la red de tuberías y pluviómetros**

**a) Aspersor 423AG; b) Aspersor Xcel Wobbler**

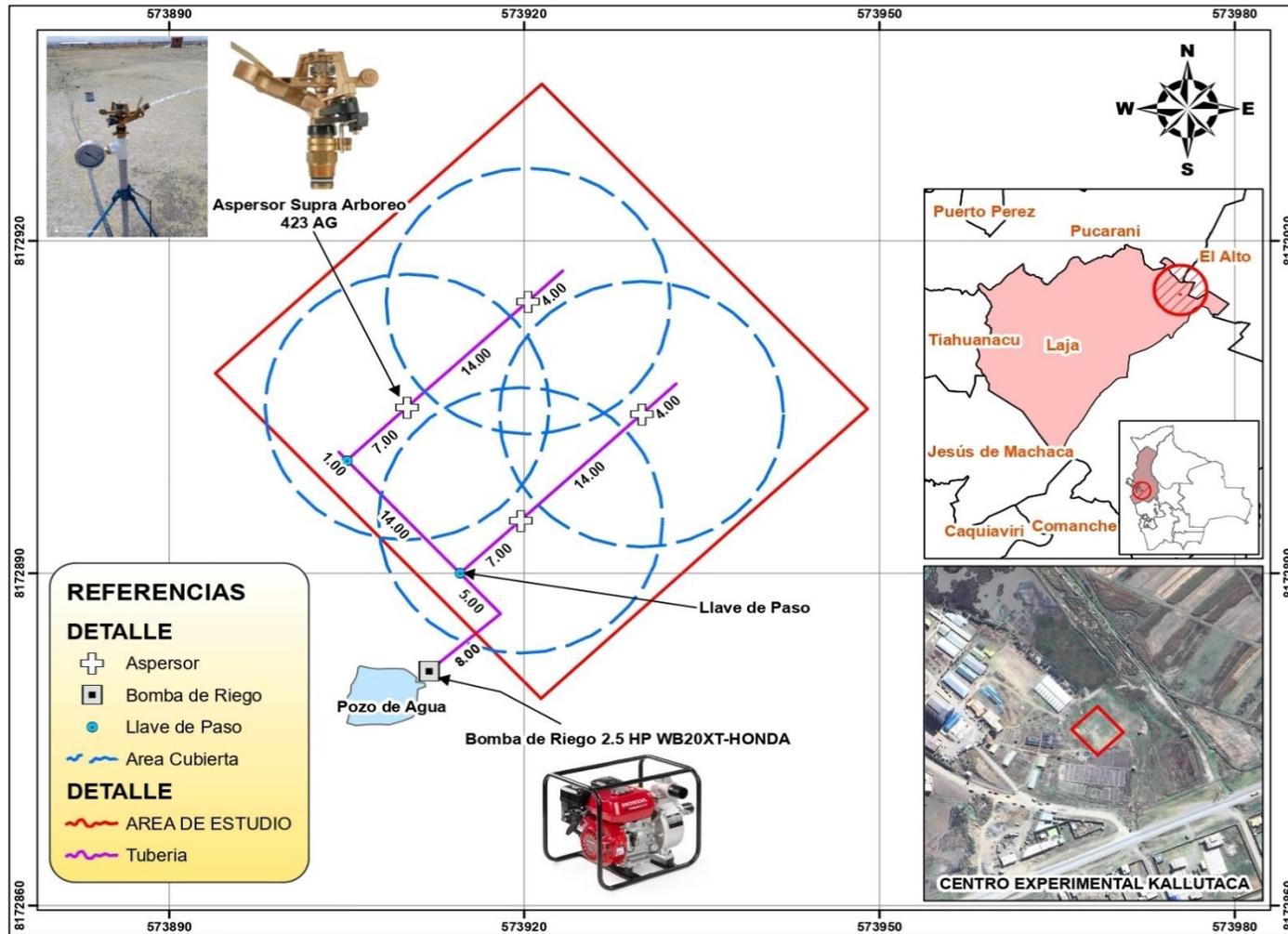


Figura 13. Diseño y ubicación del aspersor 423 AG en la zona de estudio

Fuente: Elaboración Propia

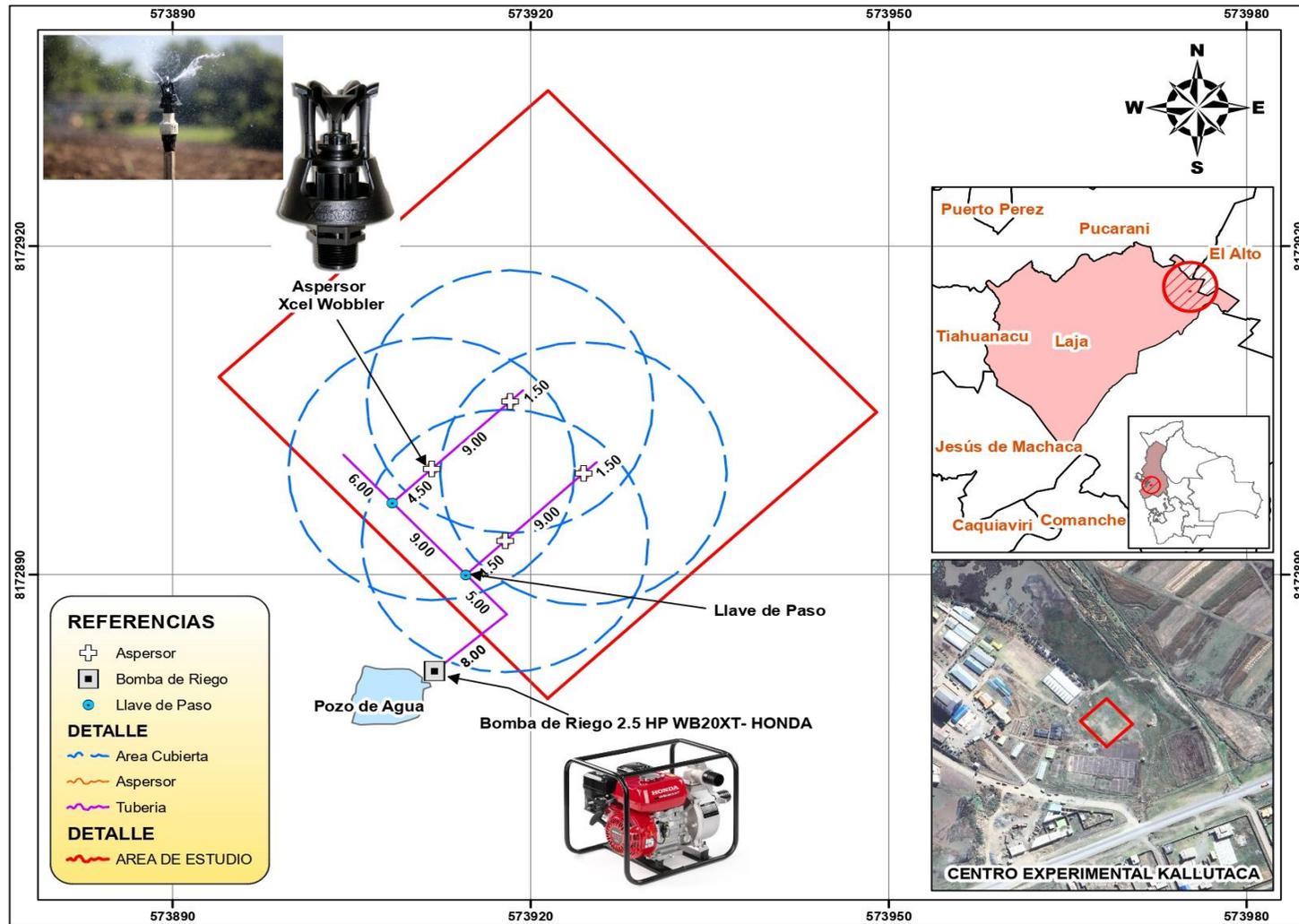


Figura 14. Diseño y ubicación del aspersor Excel Wobbler en la zona de estudio

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.1.4. Aspersores

#### 3.3.1.4.1. Selección del aspersor

La selección del aspersor se realizó en función de la presión de trabajo y del espaciamiento entre los aspersores y los laterales. Comprobando las especificaciones técnicas del fabricante (Anexos 1 y 2).

El tamaño del área mojada de un aspersor es en función a la presión de trabajo del mismo, del tipo de aspersor y diámetro de las boquillas (Figura 13).



**Figura 15.** Características de Aspersores: Xcel Wobbler, 423AG

#### 3.3.1.5. Muestreo de agua

El multiparámetro Horiba es un instrumento de medición portátil que se utiliza para analizar diversos parámetros fisicoquímicos del agua in situ, es decir, directamente en el punto de muestreo. Al utilizar este equipo para el muestreo de la fuente de agua, se pueden obtener varias ventajas importantes:

- Proporciona lecturas precisas y confiables de parámetros como pH, conductividad, oxígeno disuelto, temperatura, entre otros. Esto asegura una caracterización detallada de la calidad del agua.
- Las mediciones se realizan directamente en la fuente de agua, sin necesidad de enviar las muestras a un laboratorio. Esto evita alteraciones o cambios en las propiedades del agua durante el transporte.
- El multiparámetro Horiba agiliza el proceso de toma de muestras, ya que permite recopilar datos clave en un solo paso, sin necesidad de equipos adicionales.

#### **3.3.1.6. Determinación de las características hidráulicas**

Efectuado la inspección de los componentes del sistema de irrigación, se procedió a determinar las características hidráulicas de cada aspersor instalado. Entre las principales características hidráulicas determinadas se tiene:

- Presión (bar)
- Caudal (L/s) (L/h)
- Radio mojado (m)
- Índice de grosor de gotas

#### **3.3.1.7. Principales parámetros de evaluación**

Para detallar el comportamiento de ambos aspersores, el Xcel Wobbler y el 423 AG, se llevó a cabo un análisis de los principales parámetros que afectan a la uniformidad y la eficiencia del riego proporcionada por los aspersores. Es importante destacar que no hay un solo parámetro que sea suficiente para describir completamente el comportamiento del riego, por lo que siempre se evalúan varios parámetros al mismo tiempo.

Por tanto, se analizaron los siguientes parámetros:

- Coeficiente de uniformidad (CU)
- Uniformidad de distribución (UD)
- Eficiencia de distribución (EDa)
- Proporción efectiva de agua que llega al suelo (Pe)
- Perdidas por fugas en conducciones (Pd)
- Eficiencia de aplicación (Ea)

Estos parámetros fueron evaluados en cada hecho de riego que se realizó, con el fin de determinar cuál de los eventos de riego proporcionan una mejor eficiencia de riego.

### 3.3.1.7.1. Características hidráulicas

- **Presión (bar)**

En el presente trabajo de estudio se realizó la lectura de la presión mediante manómetros de glicerina de 4 a 6 bares de capacidad los cuales fueron instaladas en diferentes puntos de la instalación de riego a través de puntos de prueba que permitieron facilitar la lectura en diferentes oportunidades durante el tiempo de evaluación de los aspersores.

- **Caudal (Q) (L/s) (L/h)**

El caudal fue determinado para conocer el volumen de agua que pasa por una sección transversal conocida, en un tiempo determinado el cual es expresado como:

$$Q = \frac{v}{t} \quad (\text{Ec.10})$$

Donde:

Q=Caudal (L/h).

v=Volumen (L).

t=Tiempo (s).

- **Radio mojado (m)**

Serrano (2014), señala que la relación que describe las características hidráulicas, para el alcance de radio de mojado, está en función de: la presión de trabajo, caudal, ángulo de salida y diámetro de boquillas. Se realizó con la ayuda de la cinta métrica, llegando a medir desde la base del tubo porta aspersor al extremo del área mojado de cada aspersor, el radio mojado generado por los aspersores puede variar por los efectos del viento. Por otro lado, es posible estimar el radio de alcance que generan los aspersores en forma analítica, mediante la siguiente ecuación:

$$R = (6 - \sqrt{h}) * \frac{(h^{0.5} + 3 * q^{0.75})}{(d_1 + d_2)^{0.25}} * \sin 3 \alpha \quad (\text{Ec.11})$$

Donde:

$d_1$  y  $d_2$  = diámetro de boquillas en mm

$\alpha$  = ángulo en grados (entre 15 a 30°)

$q$  = caudal en m<sup>3</sup>/h

$h$  = presión en bar

- **Índice de grosor de gotas**

Según el Servicio de Asesoramiento Regante (2010), el grosor de las gotas se evalúa con el Índice de grosor (IG). Para calcular IG se medirá la presión ( $p$ ) en Kg/cm<sup>2</sup> en cada uno de los aspersores seleccionados para la evaluación y el diámetro ( $d$ ) de las boquillas en mm:

$$IG = 12,85 * \frac{p^{1,3}}{d} \quad (\text{Ec.12})$$

Tarjuelo (2005), indica un índice de grosor recomendable entre 7 y 17, valores menores a 7 indican gotas gruesas que pueden dañar cultivos delicados y destruir la estructura superficial de suelos frágiles, reduciendo la tasa de infiltración, siendo solo justificables en el caso de vientos de más de 4,5 m s<sup>-1</sup> y suelos con buena cobertura; mientras que valores mayores a 17 indican gotas finas que caen cerca del aspersor; estas son fácilmente arrastradas por el viento facilitando la evaporación y disminuyendo la eficiencia.

### 3.3.1.7.2. Parámetros e indicadores en evaluación

Para determinar estos parámetros, se utilizaron los aspersores de evaluación Xcel Wobbler y 423 AG, utilizando una red pluviométrica de 1 x 1 m centrada en un área específica. La distancia entre los laterales y los aspersores fue de 9 metros para el Xcel Wobbler y de 14 metros para el aspersor 423 AG. Además, los porta aspersores se colocaron a una altura de 1 m para minimizar la influencia del viento.

La velocidad del viento se incrementa con la altura, por lo que en el diseño del sistema el aspersor debe ubicarse lo más bajo posible, en función de la altura de los cultivos a regar, por lo que recomienda alturas que no sobrepasen los 2 metros (Tarjuelo, 1999).

- **Coeficiente de uniformidad (CU)**

El análisis del coeficiente de uniformidad (CU), desarrollado por Christiansen (1942), el cual es expresado en %, fue usado para estudiar la lluvia artificial aplicada una vez completado un periodo de riego. El coeficiente de uniformidad de Christiansen cuyo cálculo para su análisis se muestra en (Ec.2).

Tarjuelo (1999), mantiene que las pérdidas por evaporación y arrastres varían entre 5 y 10% en condiciones normales. Sin embargo, en condiciones muy severas (alta: HR, °T, Vv, y tamaños de las gotas muy pequeños) pueden resultar mayores.

De acuerdo a Keller y Bliesner (2000), se recomienda los siguientes valores:

- UD < 60% (CU < 75%) considerados bajos para cultivos extensos, así como forrajeras.
- UD > 75% (CU > 84%) es recomendado para cultivos de alto valor.

INIA (1994), señala que en general, velocidades de vientos superiores a 2.5 m/s no hacen recomendable el riego por aspersión mientras que, velocidades entre 1 a 2.5 m/s lo hacen poco recomendable, siendo óptimo velocidades inferiores a 1 m/s.

- **Uniformidad de distribución (UD)**

Según Serrano (2014), mencionado por Flores (2022), en la actualidad la expresión mas utilizada de la UD es la uniformidad de distribución en el cuarto inferior (UDci), la cual contrasta la lámina promedio de agua de riego infiltrada en el cuarto inferior.

- **Eficiencia de distribución (EDa)**

La eficiencia de distribución del agua, fue determinada para un cierto porcentaje (f) de área adecuadamente regada por los aspersores de cada tratamiento, para esto se empleó la relación desarrollada por el Dr. Richard Allen en 1987, cuyo cálculo para su análisis se muestra en la (Ec. 5 y 6).

- **Proporción efectiva de agua que llega al suelo (Pe)**

La evaporación y el efecto del viento afectan negativamente a la lluvia artificial generada por los aspersores. Una estimación de la proporción efectiva del agua descargada por los

aspersores que llegan al suelo, en función a la evapotranspiración potencial (ETP), índice de tamaño de gotas (IG) y velocidad del viento (Vv), fue calculado mediante la siguiente fórmula desarrollada por (Fisher y Allen, 1988).

$$Pe = 0.976 + 0.005 + ETP - 0.00017 * ETP^2 + 0.0012 + V + IG * (0.00043 * ETP + 0.00018 * V + 0.000016 * ETP * V)$$

(Ec.13)

Donde:

Pe = Proporción efectiva del agua emitida por los aspersores que llega al suelo

ETP = Evaporación potencial, (mm/día)

V = Velocidad del viento, (km /h)

IG =  $0.032 P^{1.3}/B$ , índice de grosor de gota

P = Presión de funcionamiento de la boquilla (kPa)

B = Diámetro de boquilla (mm)

La ecuación 13 aplica para  $7 < IG < 17$ . Si  $IG < 7$  (gota gruesa), tomar  $IG = 7$ , y si  $IG > 17$  (gota fina), tomar  $IG = 17$ . Es recomendable que el índice de grosor (IG), esté entre 7 y 17. Valores inferiores a 7 indican gotas muy gruesas, y valores mayores que 17 indican gotas muy finas. La uniformidad de riego puede verse disminuida con tamaños de gotas excesivos, se justifican valores de IG menores a 7 en condiciones de vientos fuertes de 4.5 m/s hasta 16 km/h.

- **Pérdidas por fugas en conducciones (Pd)**

Se observó las pérdidas de agua para riego por fugas, en sistemas con un adecuado mantenimiento, estas pérdidas pueden ser menores del 1% del caudal transportado, en cuyo caso la proporción entre el agua que descargan los aspersores y la bombeada estará entre  $0.99 < Pd < 1.0$ . En instalaciones con un mantenimiento insuficiente, estas pérdidas pueden superar el 10% ( $Pd = 0.90$ ), presentándose principalmente en los tubos porta aspersores y en los acoples.

- **Eficiencia de aplicación (Ea)**

La eficiencia de aplicación fue calculada para determinar el tanto por ciento del agua de riego que es realmente utilizada por el cultivo con respecto al total de agua aplicada, para

lo cual se consideró las pérdidas de agua originadas por filtración profunda, cuyo valor de análisis se realizó mediante la (Ec.4).

### **3.3.2. Fase de evaluación de riego**

#### **3.3.2.1. Evaluación de la red de pluviometría**

La evaluación se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

##### **a. Etapa 1:**

**Evaluación:** Antes de la evaluación, la dirección del chorro de los aspersores se los desvió fuera del área ocupada por los pluviómetros y se puso en funcionamiento. Esto se hizo hasta que se normalizó el flujo de agua que salía y la presión de operación.

Se midió la presión de los aspersores y del extremo de los laterales. Luego se soltaron los aspersores y se registró la hora de inicio. Este dato corresponde al inicio de la evaluación y antes de realizar esta operación, se vaciaron todos los pluviómetros, en caso de que alguno hubiera recibido agua en operaciones anteriores (Anexo 3 y 4).

##### **b. Etapa 2:**

**Post Evaluación:** Después de culminar el periodo de evaluación, se procedió a medir el volumen recogido por los pluviómetros, con la ayuda de una probeta graduada. Se recolecto todos los pluviómetros utilizados de manera ordenada, y de tal manera también se los lavo, evitando la acumulación de sedimentos (Anexo 5).

#### **3.3.2.2. Determinación del caudal por el método volumétrico**

El cálculo de caudal mediante el método volumétrico implica medir el volumen de un líquido que fluye a través de un punto específico en un tiempo determinado.

- Se comenzó con el encendido de la bomba de agua y la supervisión de la presión de operación en los manómetros.
- Se utilizo una manguera para recolectar el agua en un balde graduado de 20 litros.
- Se midió el tiempo transcurrido durante el cual se recolecta el líquido. Para el cálculo posterior.
- Una vez terminado el tiempo, se midió el volumen de líquido recolectado en litros.

- Se determino el caudal en (litros/hora)



**Figura 16. Evaluación del caudal por el método volumétrico**

### 3.3.2.3. Modelo Estadístico

Para la comparación de las variables del estudio se aplicó la prueba de t de Student, siendo esta una técnica paramétrica que compara las medias de dos grupos y verifica si la diferencia observada entre esas medias es significativa. Se realizó una prueba de t para muestras independientes, ya que el área regada por los aspersores no está relacionada entre sí (Ochoa, 2008). El nivel de significancia fue de  $\alpha = 0,05$ .

La fórmula matemática es la siguiente:

$$t = \frac{\bar{X}_A - \bar{X}_B}{\sqrt{\frac{s_A^2}{n_A} + \frac{s_B^2}{n_B}}} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

$\bar{x}_A$  y  $\bar{x}_B$  = Son las medias de los aspersores en estudio.

$S_A^2$  y  $S_B^2$  = Son las varianzas de los dos tipos de aspersores respectivamente.

$n_A$  y  $n_B$  = son los tamaños de muestra de los dos aspersores respectivamente.

#### **3.3.2.4. Evaluación de un aspersor**

Para la evaluación de un solo aspersor se realizó lo siguiente:

Se realizó una prueba para evaluar los aspersores Xcel Wobbler y 423AG. Se utilizó una bomba eléctrica Toyaki de 2HP para generar la presión necesaria. Los pluviómetros se colocaron a una distancia de 1 metro para el aspersor Xcel Wobbler y a una distancia de 1 metro para el aspersor 423 AG.

Los chorros de los aspersores se calibraron para asegurar que apuntaran hacia los pluviómetros se soltaron los aspersores y se registró la hora de inicio de la prueba.

Para determinar la dirección y velocidad del viento, se utilizó un anemómetro de la estación meteorológica de la Estación Experimental. Esto ayudó a tener en cuenta los factores externos que podrían afectar el desempeño de los aspersores

Después de un tiempo determinado, se recogió la red de pluviómetros sin alterar su orden. Se midieron los volúmenes recogidos en cada pluviómetro utilizando una probeta graduada.

#### **3.3.3. Fase de simulación de aplicación de riego por aspersión**

Los modelos de simulación para riego realizados en Excel son herramientas útiles para evaluar y optimizar la distribución del agua en un sistema de riego. Uno de los aspectos clave que se puede calcular es el Coeficiente de Uniformidad (CU), que mide la uniformidad con que se distribuye el agua en el área irrigada.

- Se generó una tabla en Excel incluyendo variables como la fecha, tiempo de riego, caudal, distancia entre aspersores y radio mojado.
- Se introdujo el modelo del aspersor que se utilizó en el sistema de riego.
- Posteriormente se introdujo la cantidad de pluviómetros.
- Posteriormente se registró el tiempo de funcionamiento del sistema por aspersión.
- Se registró el caudal de salida del aspersor.
- Se registró la velocidad del viento.
- Se registró la dirección del viento.
- Se registró la separación de los pluviómetros.
- Posterior a ello se registró los datos de los pluviómetros recolectados, en función a las filas y columnas de la red de pluviómetros.

- Posterior a ello se obtuvo el resultado en grafico 3D en el programa Surfer. Para tomar en cuenta y simular diferentes espaciamientos entre aspersores, se eligió valores arbitrarios de separación de los aspersores y se obtuvo diferentes resultados.
- Este procedimiento se realizó para cada tipo de aspersor (Xcel Wobbler y 423 AG) con 5 diferentes separaciones entre aspersores.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Características de la calidad del agua

#### 4.1.1. Calidad del agua

La calidad del agua es una variable fundamental del riego, ya que afecta tanto a las plantas como a los suelos, se realizó el muestreo respectivo de agua proveniente del subsuelo (Pozo).

El Cuadro 5, muestra los resultados del multiparámetro del análisis físico-químico del agua para riego (Anexo 6); la recolección de muestras se efectuó en el pozo de agua que se utiliza en la E.E. Kallutaca de la Universidad Pública de El Alto.

**Cuadro 5. Parámetros de la calidad del agua**

PARAMETROS	RESULTADOS	UNIDADES
Temperatura	15,51	°C
pH	8,37	pH
Conductividad eléctrica	0,26	mS/cm
Turbidez	35,90	NTU
Oxígeno disuelto	9,78	mg/L OD
Oxígeno disuelto en %	98,07	% OD
Solidos totales disueltos	0,11	g/L TDS
Salinidad	0,08	%

Fuente: Elaboración propia

- a.) Temperatura:** Del agua medida es de 15,51 grado Celsius, se encuentra dentro del rango (ABC, 2004).
- b.) pH:** El resultado 8,37 se encuentra dentro del rango (6,5 – 8,4), permitiendo clasificar a la misma como agua básica o alcalina. Se encuentra dentro del rango permitido para el riego según (Monge, 2017).
- c.) Conductividad Eléctrica:** Expresada en mS/cm (0,26) indica una conductividad moderada apta para la mayoría de los cultivos (Fertilab, 2022).
- d.) Turbidez:** El resultado 35,90 NTU es aceptable no obstruyen los sistemas de irrigación ni afectan negativamente a las plantas.

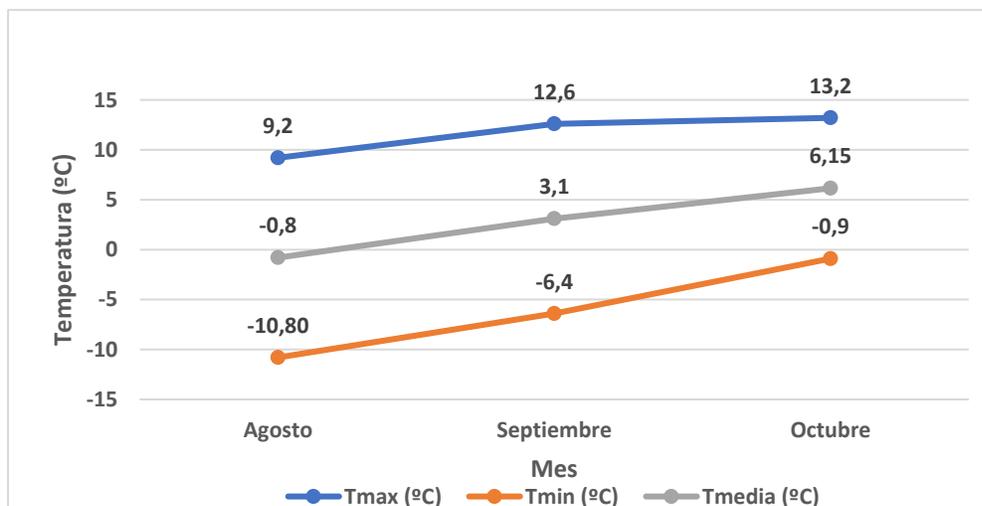
- e.) Oxígeno disuelto:** Este rango de 9,78 mg/L OD se considera adecuado, y el 98,07 % OD de la saturación de oxígeno disuelto se considera optima ya que cuenta con una concentración suficiente de oxígeno y se recomienda monitorear los niveles de oxígeno del pozo.
- f.) Sólidos totales disueltos:** Los sólidos totales disueltos (TDS) comprenden las sales inorgánicas (principalmente calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que se disuelven en el agua, el resultado 0,11 g/L TDS se encuentra en el rango de aguas con una concentración menor (Fertilab, 2022).
- g.) Salinidad:** 0,08 % el resultado nos da a entender que el agua tiene una baja salinidad (Monge, 2017).

## 4.2. Parámetros climáticos durante el periodo de investigación

El clima es uno de los factores más importantes que determinan el volumen de las pérdidas de agua por evapotranspiración de los cultivos y por lo tanto de las necesidades de riego. Tarjuelo (1999), mencionado por Callisaya (2018), señala que dentro de los principales factores que influyen en las pérdidas de agua por evaporación en el aire se puede señalar a la humedad ambiental, la temperatura del aire y del agua, la velocidad del viento y entre otras características. Por tanto, las frecuencias de riego, están directamente relacionadas con las condiciones climáticas. Así por ejemplo a temperaturas altas y humedad relativa baja provocan una mayor demanda de agua por los cultivos, lo que se traduce en la necesidad de disminuir los intervalos entre eventos de riego.

### 4.2.1. Temperatura

La temperatura llega a ser uno de los factores que influyen en los valores de la evapotranspiración potencial o de referencia (ET<sub>o</sub>), es por esto que, durante las diferentes evaluaciones realizadas en campo, se obtuvieron lecturas diarias de las temperaturas máximas, mínimas y medias, para los meses de agosto, septiembre y octubre, dichos datos fueron obtenidos de la estación automática agrometeorológica, instalado en la E.E de Kallutaca de la carrera de Ingeniería Agronómica.



**Figura 17. Variaciones en la temperatura del aire durante los meses de evaluación, según los datos recopilados de la Estación Meteorológica de la carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad Pública de El Alto.**

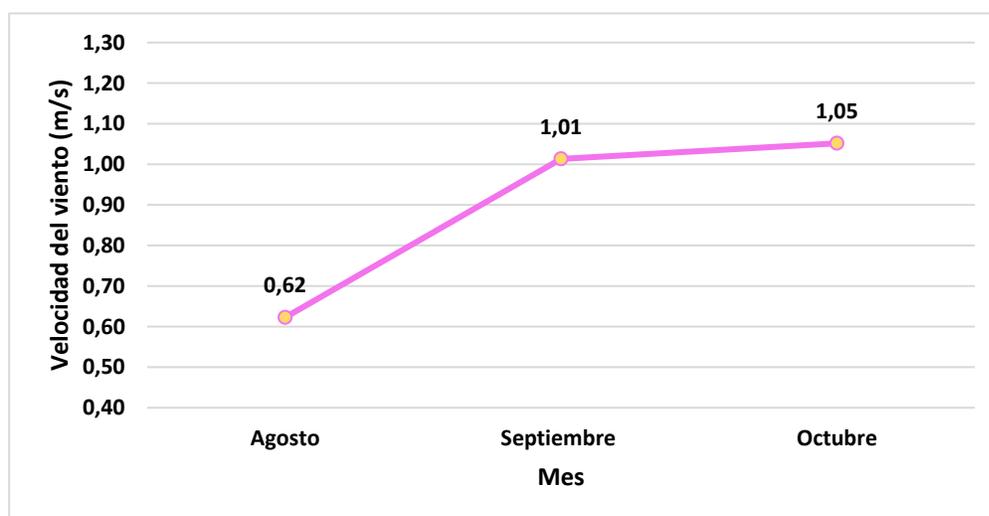
Los valores de la figura 17, muestra la variación de temperaturas máximas, mínimas y medias que ocurrió en la etapa de investigación, donde se aprecia un comportamiento casi homogéneo de temperatura máxima, siendo la temperatura más alta en el mes de octubre con 13,2°C, al contrario, las temperaturas mínimas ocurrieron en el mes de agosto con -10,80°C. Guarachi (2013), recomienda no regar, a 20°C de temperatura máxima ya que llegarían a causar mayores pérdidas por evaporación, otro aspecto importante a señalar que la temperatura del agua llega a disminuir en horarios de la tarde mucho más lento que la temperatura del aire.

Durante la mañana las temperaturas suelen ser más bajas y la humedad del aire es mayor, esto reduce la evaporación del agua, permitiendo que las plantas absorban más la humedad del suelo y estas son aprovechadas por las raíces antes de que las altas temperaturas provoquen una mayor evaporación.

#### 4.2.2. Velocidad del viento

SIAR (1999) citado por Guarachi (2013), señala que el viento como el movimiento de aire sobre una superficie (hoja o suelo), determina una mayor evaporación al arrastrar el vapor de agua y evitar la acumulación de ésta en la zona inmediatamente adyacente. Por tal razón, en una misma zona climática podemos esperar que la evapotranspiración sea considerablemente mayor, bajo condiciones de viento fuerte, en comparación a un día calmado.

La evapotranspiración está influenciada por la radiación neta, la humedad relativa, la temperatura y la velocidad del viento (Callisaya, 2018).



**Figura 18. Variación en la velocidad del viento (m/s) durante el proceso de evaluación, a partir de los datos recogidos de la Estación Meteorológica de la carrera de Ingeniería Agronómica**

Faci y Bercero (1992), señalan que las pérdidas por arrastre de viento se producen cuando las gotas de agua emitidas por los aspersores son arrastradas fuera de la superficie regada antes de alcanzar la superficie del suelo, estas pérdidas dependen de la intensidad del viento y de la elevación de las boquillas del aspersor sobre el suelo. Durante el riego por aspersión las pérdidas por evaporación y arrastre de agua por el viento se producen simultáneamente, lo cual dificulta enormemente su estimación individualizada.

Se puede observar en la figura 18 que la velocidad del viento en los diferentes meses es casi homogénea, teniendo así en el mes de agosto una velocidad del viento de 0,62 m/s, para el mes de septiembre una velocidad del viento de 1,01 m/s y por último el mes de octubre 1,05 m/s. Faci y Bercero (1991) mencionados por Cisneros *et al.* (2019), indican que entre 2,5 y 3,5 m/s el límite general de velocidad del viento por encima del cual no resulta recomendable regar en riego por aspersión. Por otro lado, los diferentes valores de la incidencia del viento cuyos datos son de gran importancia para poder determinar la proporción efectiva de agua que llega al suelo ( $P_e$ ), esto con la finalidad de obtener la eficiencia de aplicación del sistema ( $E_a$ ), durante las diferentes evaluaciones que serán analizadas más adelante.

### 4.2.3. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)

Guarachi (2013), alude que la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), es sumamente importante para la determinación de la proporción efectiva de agua que llega al suelo (P<sub>e</sub>), a esto Hargreaves (1976), indica, que la temperatura y la radiación para una determinada latitud, juntas pueden ser utilizadas para predecir efectivamente la mayoría de la variación en ET<sub>o</sub> (94%). Es importante señalar que la determinación de la ET<sub>o</sub>, por este método llega a ser efectivo, en situaciones donde solamente se cuenta con parámetros de temperatura (mínimas, medias y máximas) y radiación extraterrestre (R<sub>a</sub>), que puede ser obtenida de tablas para determinado mes y Latitud.

**Cuadro 6. La evapotranspiración de referencia (mm/día), durante el transcurso de la evaluación**

<b>Evapotranspiración de referencia (mm/día)</b>		
<b>Agosto</b>	<b>Septiembre</b>	<b>Octubre</b>
3,65	4,05	4,74

En el cuadro 6 podemos apreciar valores promedios de las evaluaciones que se realizaron en cada mes: con una estimación de 3,65 mm/día para agosto, 4,05 mm/día para septiembre y 4,74 mm/día para octubre, estos resultados de la evapotranspiración varía drásticamente conforme a los parámetros influyentes durante la época, obteniéndose valores bajos de ET<sub>o</sub> en días lluviosos, húmedos, nublados y sin vientos, en cambio los valores altos se presentarán en los días soleados, secos y con fuertes vientos, es por esto que en los meses de septiembre y octubre, los valores de ET<sub>o</sub> son mucho mayores, debido a una mayor radiación recibida en el suelo, mayores incidencias por parte del viento y por la ausencia de precipitaciones.

### 4.3. Características hidráulicas de los aspersores Xcel Wobbler y 423 AG

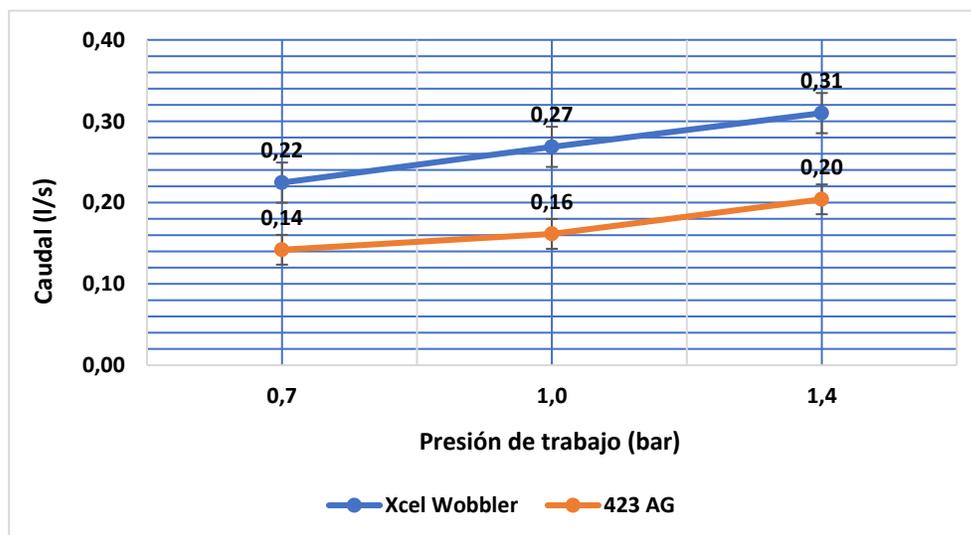
Cada emisor se caracteriza básicamente por la presión de funcionamiento la mejor distribución de agua sobre el terreno es otro aspecto por el caudal correspondiente a una presión dada y por el diámetro correspondiente del círculo mojado.

### 4.3.1. Caudal versus presión

El caudal expulsado por cada aspersor depende de la presión de trabajo y los diámetros que determinadas boquillas poseen. En general, el caudal aumenta al aumentar el diámetro de la boquilla, la presión o ambos a la vez. Sin embargo, la relación entre estas variables dependerá del modelo y marca del aspersor. Es por esto que cada fabricante dispone de catálogos que presentan las características de funcionamiento de los diferentes modelos de aspersores disponibles en el mercado. En la evaluación hidráulica, se emplearon aspersores Xcel Wobbler con un diámetro de boquilla de 4,76 mm, y el tipo de aspersor 423 AG con un diámetro de boquilla de 4,0 mm, cuyo diseño fue sometido a diferentes presiones de trabajo, para determinar los diferentes gastos generados (caudal del aspersor).

**Cuadro 7. Caudal emitido por los aspersores Xcel Wobbler y 423 AG determinados en (l/s) y (l/h), según la presión de trabajo (bar), mediante el método volumétrico**

Aspersor	Presión de trabajo (bar)	Caudal (l/s)	Caudal (l/h)
Xcel Wobbler	0,7	0,22	792
	1,0	0,27	972
	1,4	0,31	1116
423 AG	0,7	0,14	504
	1,0	0,16	576
	1,4	0,20	720



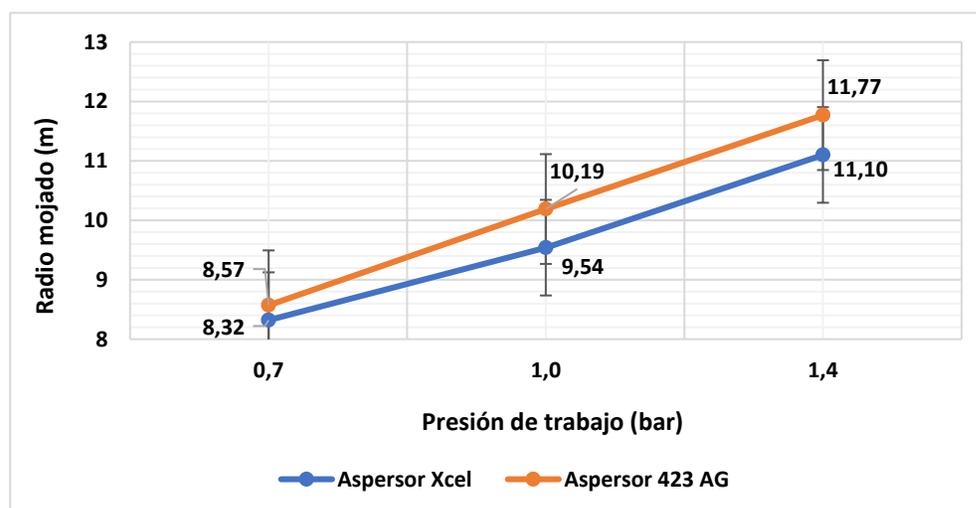
**Figura 19. Curva caudal versus presión (Q vs P), obtenido en campo**

En la figura 19, se presentan los resultados de la evaluación hidráulica de caudal vs presión de ambos aspersores, donde se puede apreciar que para una presión mínima de 0.7 bares, el aspersor Xcel Wobbler entrega un caudal de 0,22 l/s, (792 l/h) y el aspersor 423 AG entrega un caudal de 0,14 l/s, (504 l/h). A una presión de 1,0 bar, el aspersor Xcel Wobbler llega a entregar un caudal de 0,27 l/s, (972 l/h), de la misma manera el aspersor 423 AG entrega un caudal de 0,16 l/s, (576 l/h), a una presión máxima de 1,4 bares el aspersor Xcel Wobbler llega a entregar un caudal de 0,31 l/s, (1116 l/h) y el aspersor 423 AG un caudal de 0,20 l/s, (720 l/h).

#### **4.3.2. Radio mojado**

El alcance de un aspersor que determina el radio de mojadura, depende del ángulo de inclinación de la boquilla y de la presión de funcionamiento. El valor máximo del radio de mojadura se obtiene con un ángulo de inclinación de 45°, el cual debe ser seleccionado si el viento no es importante. Sin embargo, bajo condiciones de viento, deben seleccionarse aspersores de bajo ángulo, siendo los más recomendados aquellos aspersores con ángulos de ataque entre 25 y 27° (Guarachi, 2013).

En la figura 20, se presenta las curvas del radio de alcance (m), a una determinada presión de funcionamiento de los aspersores Xcel Wobbler y 423 AG, donde se puede apreciar que para una presión mínima de funcionamiento de 0.7 bar, el aspersor Xcel Wobbler genera un radio de alcance de 8,32 m y para el aspersor 423 AG a la misma presión de funcionamiento llega a generar un radio de alcance de 8,57 m, por otro lado para una presión de funcionamiento de 1,0 bar, el aspersor Xcel Wobbler genera un radio de alcance de 9,54 m, y para la misma presión de funcionamiento el aspersor 423 AG, genera una radio de alcance de 10,19 m, cabe mencionar que a una presión de 1,4 bar el aspersor Xcel Wobbler genero un radio de alcance de 11,1 m, por otro lado el aspersor 423 AG genero un radio mojado de 11,77 m.



**Figura 20. Curvas del radio de alcance (m), con efecto del viento de 1,11 m/s en relación a la presión de funcionamiento, para aspersores Xcel Wobbler y 423 AG**

Mediante evaluaciones realizadas en campo, se determinó el radio mojado generado por los aspersores Xcel Wobbler y 423 AG, a esto es importante señalar la influencia del viento sobre la aplicación del agua en el suelo, ya que este proceso llega a tener una gran dependencia de la acción del viento en intensidad y dirección, llegando de esta manera a distorsionar el radio mojado emitido por los aspersores, es por esto que llega a ser de suma importancia obtener información sobre la velocidad y dirección del viento durante la evaluación.

#### **Cuadro 8. Características hidráulicas del aspersor Xcel-Wobbler**

<b>Aspersores de boquilla #12 - Roja (4.76mm)</b>		
<b>Presión (bar)</b>	<b>Caudal (l/h)</b>	<b>Diámetro (m)</b>
0,69	734	14,00
1,03	899	15,4
1,38	1038	15,9
1,72	1161	16,6

Fuente: Senninger (2012)

El aspersor Xcel-Wobbler es un producto fabricado por Senninger, el cual aumenta al máximo la superficie de cobertura y su exclusiva acción rotativa oscilante produce una cobertura sumamente uniforme, a bajas presiones y con una pérdida muy baja por evaporación, lo cual llega a ser favorable para el productor, otro aspecto de estos

aspersores es que posee boquillas codificadas por color para su fácil identificación de tamaño (diámetro de boquilla), y con garantía de mantener el diámetro correcto de orificio por cinco años (Guarachi, 2013).

En el cuadro 8, se puede observar las características hidráulicas sin el efecto del viento, del aspersor Xcel-Wobbler, de boquilla #12-Roja (4.76mm), donde el aspersor llega a funcionar desde bajas presiones (0.69 a 1.72 bares) y los gastos emitidos a dicho diámetro de boquilla varían entre (734 a 1161 l/hr), por otro lado, los diferentes diámetros de radio mojado generados a dichas presiones, oscilan entre (14.0 a 16.6 m).

Realizando una comparación, con los resultados de diámetro de alcance obtenidos para los aspersores con la incidencia del viento de 1,11 m/s, descrito en el cuadro 7, se puede observar como ejemplo, a una presión de 0,7 bar y a una altura de 1 m del portaaspersor, desfogó un caudal de 792 l/h generando un diámetro de alcance de 16,64 m. Asimismo con una presión de 1,0 bar, desfogo un caudal de 972 l/h, generando un diámetro de alcance de 19,08 m a una altura del portaaspersor de 1 m. A una presión de 1,4 bar se generó un diámetro de alcance de 22,2 m, desfogando un caudal de 1116 l/h, el cual comparándolo con el diámetro generado (14 m) y caudal desfogado (734 l/h) por el Xcel Wobbler, a una presión de funcionamiento de 0,69 bar, se puede notar que el aspersor evaluado en campo llega a obtener características más favorables para el productor, tanto en la relación de presión versus caudal y como del diámetro mojado obtenido.

#### **Cuadro 9. Rendimientos obtenidos para los aspersores de impacto 423 AG**

<b>Aspersor 423 AG boquilla negro de (4.00mm)</b>			
<b>Presión (bar)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Caudal (l/h)</b>	<b>Diámetro (m)</b>
2,0	0,850	850	25
3,0	1,030	1030	27
4,0	1,180	1180	28

Fuente:NDI (2015)

En el cuadro 9, se puede apreciar los diferentes rendimientos del aspersor de impacto 423 AG fabricados por (Naan Dan Jain), que están basados sobre datos de pruebas actuales que fueron obtenidos sin el efecto del viento, tanto en caudal desfogado a determinada presión y radio mojado. Los aspersores de impacto generalmente cuentan con una o dos boquillas de diferente diámetro y ángulo de trayectoria.

Según los valores del cuadro 9, se puede observar que este aspersor cuenta con una mayor capacidad de alcance de (diámetro mojado), lo cual nos permite diseñar el sistema de irrigación, con un mayor espaciamiento entre aspersores como laterales (marco de riego); otro aspecto importante a señalar es, que para el trabajo eficiente de los aspersores generalmente requieren de una mediana presión (2 a 4 bares), a una elevada presión de trabajo (mayores a 4 bares), lo que provoca que sea dificultoso su uso por parte de los agricultores que no cuentan con una presión adecuada.

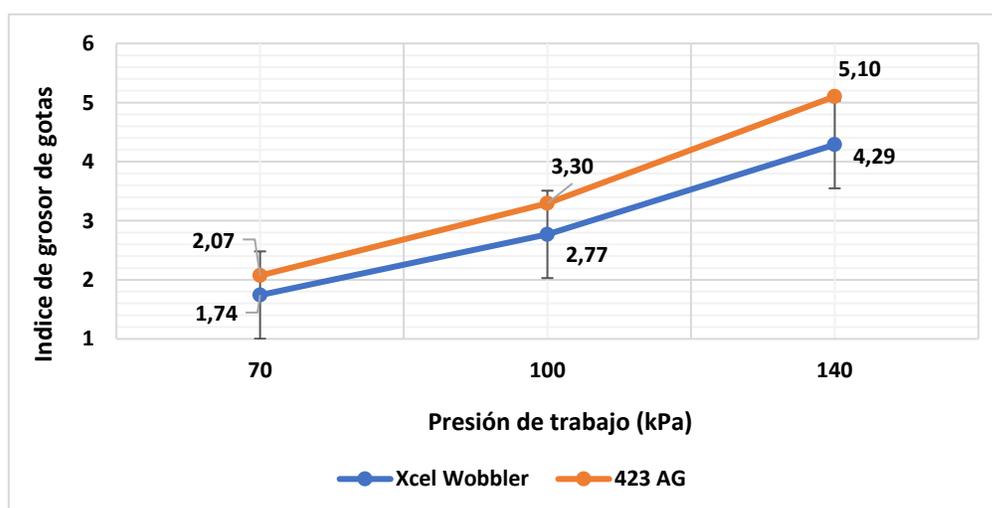
Estas condiciones, comparadas con las condiciones de presión que se realizaron en campo se puede observar como ejemplo, a una presión de 0,7 bar y a una altura de 1 m del portaaspersor, desfoga un caudal de 504 l/h generando un diámetro de alcance de 17,14 m. Asimismo con una presión de 1 bar, desfoga un caudal de 576 l/h, generando un diámetro de alcance de 20,38 m a una altura del portaaspersor de 1 m. A una presión de 1,4 bar se generó un diámetro de alcance de 23,54 m, desfogando un caudal de 720 l/h, el cual comparándolo con el diámetro generado (25 m) y caudal desfogado (850 l/h) por el 423 AG en condición de laboratorio, a una presión de funcionamiento de 2,0 bar, se puede notar que el aspersor evaluado en campo llega a obtener características más favorables para el productor, tanto en la relación de presión versus caudal y como del diámetro mojado obtenido.

#### **4.3.3. Índice de grosor de gotas**

Para la aplicación uniforme del agua depende del diseño del aspersor, el tipo y número de boquillas, el diámetro de la boquilla y de la presión de funcionamiento (lo que define el modelo de reparto de agua del aspersor), así como de la disposición de los aspersores en el campo.

Para la evaluación del índice de grosor de la gota generado por los aspersores (IG) descrita en la fórmula desarrollada por Fisher y Allen (1988), se emplearon aspersores Xcel Wobbler con un diámetro de boquilla de 4,76 mm y el aspersor 423 AG con un diámetro de boquilla de 4 mm, por lo cual en el cuadro 10, se puede observar los diferentes resultados de índice de grosor obtenidos para boquillas con diámetro de 4,76 mm para el Xcel Wobbler y 4 mm de diámetro para el aspersor 423 AG a diferentes presiones de funcionamiento.

En la figura 21, se presenta las curvas del índice de grosor de gota (IG), generado por los aspersores Xcel Wobbler con boquilla de 4,76 mm y 423 AG con boquilla de 4,00 mm a determinadas presiones de funcionamiento, donde se puede apreciar que para una presión mínima de funcionamiento de 70 kPa, el aspersor con boquilla de 4,76 mm, genera una lluvia artificial con un índice de grosor o tamaño de gotas de 1.74, y para boquilla de 4,00 mm para la misma presión de funcionamiento, genera un índice de grosor o tamaño de gotas de 2,07, por otro lado para una presión de funcionamiento de 100 kPa, el aspersor con boquilla de 4,76 mm, genera una lluvia artificial con un índice de grosor o tamaño de gotas de 2,77, y para la boquilla de 4,00 mm para la misma presión de funcionamiento, genera un índice de grosor de 3,30, por ultimo a una presión de funcionamiento de 140 kPa, el aspersor con boquilla 4,76 mm, genera una lluvia artificial con un índice de grosor de gota de 4,29, y para el aspersor con boquilla de 4,00 mm con la misma presión de funcionamiento genera un índice de grosor de gota de 5,10.



**Figura 21. Curva del índice de grosor (IG), para una boquilla de 4,76 mm correspondiente al aspersor Xcel Wobbler y la boquilla de 4 mm correspondiente al aspersor 423 AG en relación a la presión de funcionamiento (IG vs P)**

Según Fernandez *et al.* (2010), el índice de grosor de gota (IG) recomendable está entre 7 y 17. Valores menores a 7 indican gotas demasiado gruesas y valores mayores a 17 indican gotas demasiado finas.

Por tanto, según los valores obtenidos de (IG), para los aspersores, conforme a la figura 21, se puede estimar que el agua desfogada por las boquillas del aspersor Xcel Wobbler y 423 AG a bajas presiones de funcionamiento, es fragmentada en gotas de gran tamaño y esta cae en forma de anillos a cierta distancia del aspersor, obteniéndose una distribución deficiente e inadecuada (poco uniforme).

#### **4.4. Evaluación de las características hidráulicas en el sistema**

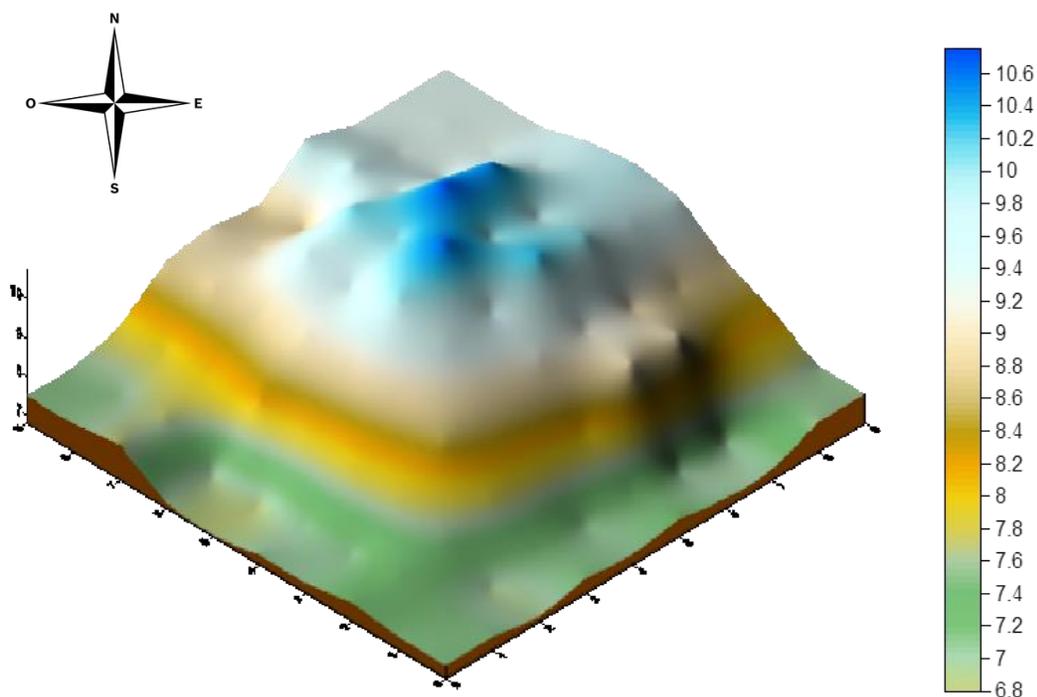
Definida ya las características hidráulicas de los aspersores individualmente (relación presión-caudal, diámetro de alcance e índice de grosor de gotas), se vio de gran importancia, determinar el comportamiento de los aspersores, ya que la presión de funcionamiento no llega a ser uniforme, es decir que a una determinada presión de servicio, no todos los aspersores trabajaran a una misma presión de funcionamiento, esto debido a factores como la pérdida de carga por fricción en conductos a presión. los dimensionamientos de las tuberías.

Revilla (2010), señala que una norma básica, aunque extrema, es que la diferencia de presión entre el primer aspersor y el último en un ramal no debe ser superior al 20 % de la presión nominal del aspersor (es decir a la presión a la que debería funcionar el aspersor, según está en el catálogo comercial), y para conseguir una buena uniformidad, es conveniente que la diferencia de caudal entre el aspersor que suministra menor cantidad de agua y el que más suministra no sea mayor que el 10% del caudal medio de todos los aspersores de ese ramal.

#### 4.4.1. Comportamiento hidráulico de los dos tipos de aspersores

##### 4.4.1.1. Primera evaluación del aspersor Xcel Wobbler

Se describen los resultados de la primera evaluación de los Coeficientes de Uniformidad de Christiansen (CU) y la eficiencia de aplicación (EA) obtenidos del aspersor Xcel Wobbler, en una hora, de evaluación para determinar la pluviometría.



**Figura 22. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 9 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 88,8 %, a una velocidad del viento de 0,4 m/s.**

En la figura 22, observamos los datos obtenidos mediante la pluviometría, graficados tridimensionalmente mediante un simulador, utilizando un programa computacional (SURFER), donde nos permite apreciar claramente como los aspersores aplican el agua en el área de evaluación y entre ellos el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen obtenido (88.8%), siendo su incidencia durante la evaluación de 0.4 m/s, con una dirección de Sur a Oeste.

Otro aspecto bastante interesante, que se muestra en la figura donde la altura de agua (mm) aplicada sobre la zona evaluada, es representada gráficamente en el espacio por diferentes colores (escala de colores), teniendo así una escala de color azul que representa a las máximas láminas de agua aplicada (9,4 a 10,6 mm), y la escala de verde que representa a las láminas mínimas de agua aplicada (11 hasta aproximadamente 7,6 mm). Por otro lado, es importante señalar que esta evaluación al igual que los otros, se lo realizaron en un periodo de 60 minutos, en un marco de riego de 9 m entre aspersores y 9 m entre laterales, donde se emplearon tubos portaaspersores de una altura de 1 m, para tener una menor incidencia del viento.

**Cuadro 10. Parámetros para la primera evaluación del aspersor Xcel Wobbler**

CU %	EDa %	Pe	Pd	EA %
88,8	85,30	0,980	1	83,63

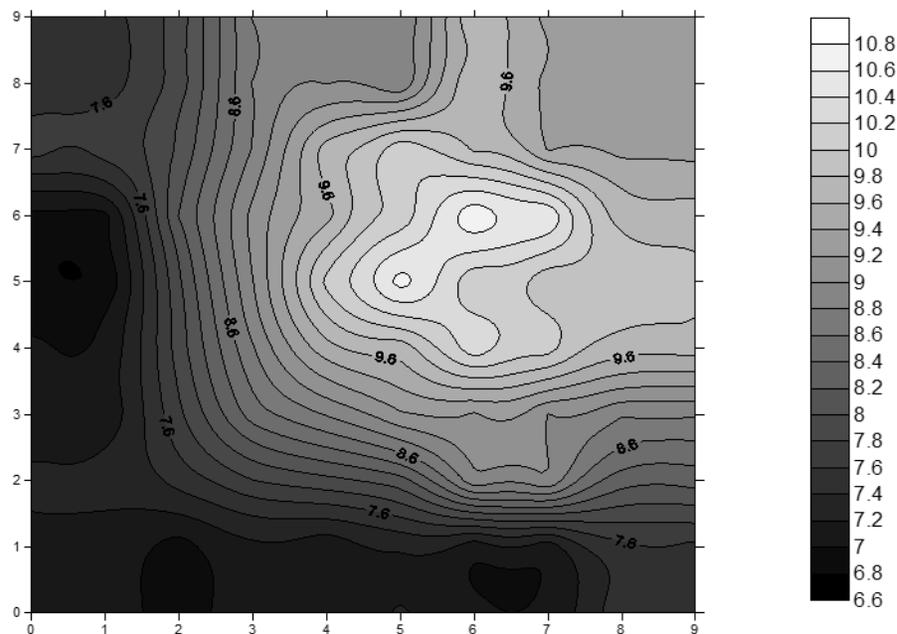
Fuente: Elaboración propia

**Donde:** **CU:** Coeficiente de Uniformidad; **EDa:** Eficiencia de distribución de agua; **Pe:** Proporción efectiva de agua que llega al suelo; **Pd:** Perdidas por fugas en conducción; **EA:** Eficiencia de Aplicación.

La EDa = 85,30%, junto a valores de Pe = 0,980 y Pd = 1; permiten determinar una EA = 83,63%, valor que indica que  $\frac{3}{4}$  partes de la parcela recibió este porcentaje del agua aplicada.

El INIA (2001), señala que en general, velocidades de vientos superiores a 2,5 m/s no es recomendable al riego por aspersión, mientras que velocidades entre 1 a 2,5 m/s es poco recomendable, siendo óptimo las velocidades inferiores a un metro por segundo.

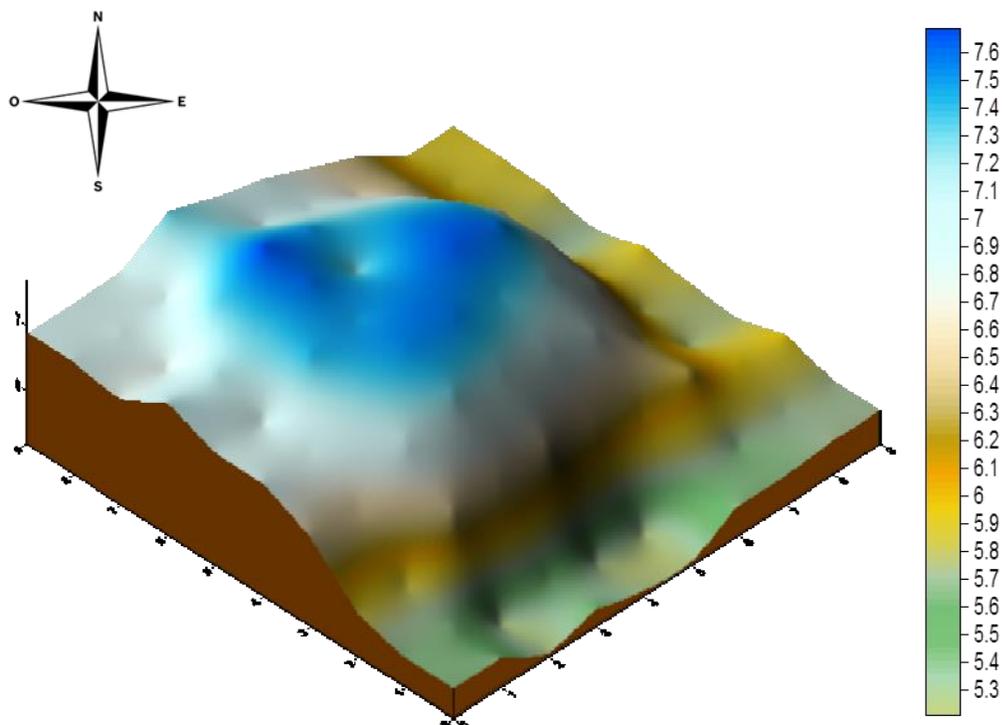
Como un modo de complementar la evaluación realizada, se incluye la parte espacial, que llega a ser una de las principales formas de indicar la uniformidad en el área de riego, ya que un solo valor como 88,8% de Coeficiente de Uniformidad, podría enmascarar o presentar otras situaciones. Es por esto que utilizando un programa que nos permite interpolar los datos obtenidos en los pluviómetros y presentarlos como curvas de nivel, lo que hace posible visualizar la espacialidad de los datos, de esta manera permitiéndonos observar claramente las zonas con mayor y menor lámina de agua aplicada, durante el evento de riego en el área de evaluación, como puede ser observado en la siguiente figura.



**Figura 23. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 88, 8%**

En la figura 23, puede contemplarse la visualización espacial del área evaluada, conjuntamente con una escala de color (negro), donde las zonas con una tonalidad más clara señalan puntos con mayor lámina de agua aplicada (mm), presentándose con mayor incidencia, en la parte central del área evaluada entre cuatro aspersores, debido al traslape o solapamiento entre ellos y por otro lado las tonalidades oscuras de la escala, señalan puntos con un menor grado de lámina de agua aplicada, que generalmente están ubicadas en los extremos. Obteniéndose láminas de agua entre los 6,6 a 10,8 mm. Es de esta manera que el presente evento de riego, con un Coeficiente de Uniformidad de 88.8%, llega a clasificarse como de buena uniformidad según el Servicio de Asesoramiento Regante (2010), donde considera como una uniformidad buena a valores de 80 al 85%.

#### 4.4.1.2. Segunda evaluación del aspersor Xcel Wobbler



**Figura 24. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 9 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 90,7 %, a una velocidad del viento de 0,4 m/s.**

La figura 24, corresponde a la segunda evaluación de pluviometría cuyos valores se muestran en el Anexo 8, obteniéndose un Coeficiente de Uniformidad de Christiansen de (90,7%), bajo la influencia del viento, siendo su incidencia durante la evaluación de 0.4 m/s, con una dirección de Sur a Oeste. También se puede observar donde la altura de agua (mm) aplicada sobre la zona evaluada, es representada gráficamente por diferentes colores, teniendo así una escala de color azul que representa a las máximas láminas de agua aplicada (6,9 a 7,6 mm), y la escala de verde que representa a las láminas mínimas de agua aplicada (5,3 hasta aproximadamente mm).

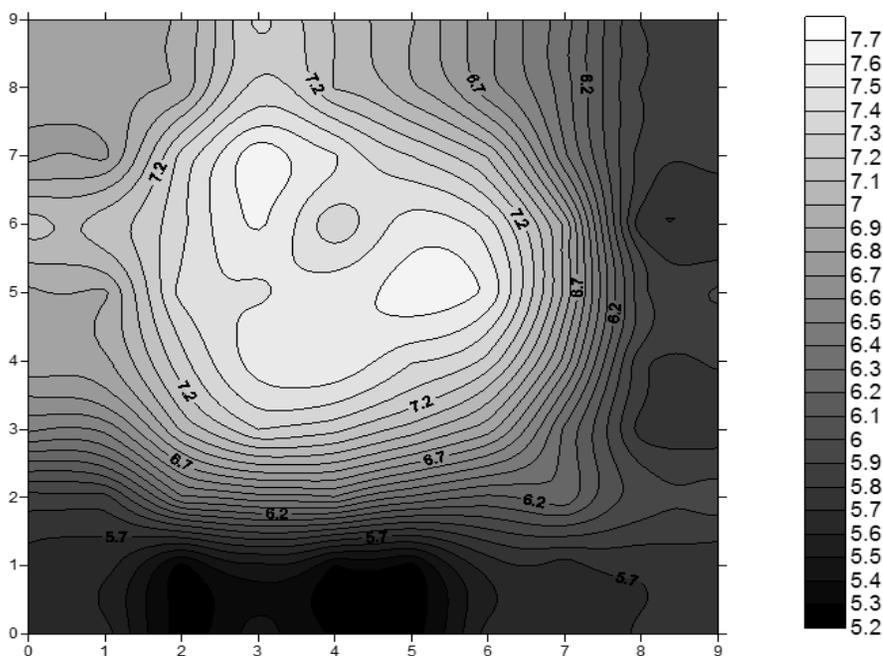
**Cuadro 11. Parámetros para la segunda evaluación del aspersor Xcel Wobbler**

CU %	EDa %	Pe	Pd	EA %
90,7	87,79	0,980	1	86,07

Fuente: Elaboración propia

**Donde:** **CU:** Coeficiente de Uniformidad; **EDa:** Eficiencia de distribución de agua; **Pe:** Proporción efectiva de agua que llega al suelo; **Pd:** Perdidas por fugas en conducción; **EA:** Eficiencia de Aplicación.

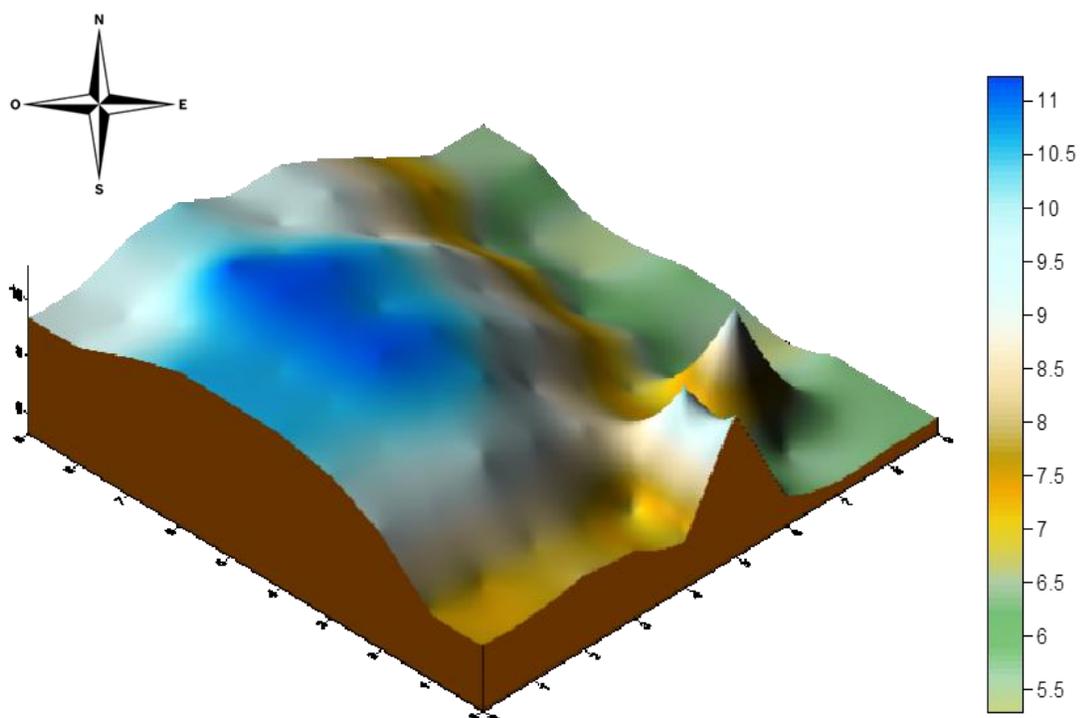
La EDa = 87,79%, junto a valores de Pe = 0,980 y Pd = 1; permiten determinar una EA = 86,07%, valor que indica que  $\frac{3}{4}$  partes de la parcela recibió este porcentaje del agua aplicada.



**Figura 25. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 90,7%**

En la figura 25, puede contemplarse la visualización espacial del área evaluada, conjuntamente con una escala de color (negro), donde las zonas con una tonalidad más clara señalan puntos con mayor lámina de agua aplicada (mm), presentándose con mayor incidencia, en la parte central del área evaluada entre cuatro aspersores, debido al traslape o solapamiento entre ellos y por otro lado las tonalidades oscuras de la escala, señalan puntos con un menor grado de lámina de agua aplicada, que generalmente están ubicadas en los extremos derechos. Obteniéndose láminas de agua entre los 5,2 a 7,7 mm. Es de esta manera que el presente evento de riego, con un Coeficiente de Uniformidad de 90,7%, llega a clasificarse como una uniformidad aceptable, según el Servicio de Asesoramiento Regante (2010), donde considera como una uniformidad aceptable a valores de 70 al 80%.

#### 4.4.1.3. Tercera evaluación del aspersor Xcel Wobbler



**Figura 26. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 9 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 80,7 %, a una velocidad del viento de 0,7 m/s.**

La figura 26, corresponde a la pluviometría obtenida cuyos valores se muestran en el Anexo 8, obteniéndose un Coeficiente de Uniformidad de Christiansen de (80,7%), bajo la influencia del viento, siendo su incidencia durante la evaluación de 0.7 m/s, con una dirección de Sur a Oeste. También se muestra la altura de agua (mm) aplicada sobre la zona evaluada, representada gráficamente por diferentes colores (escala de colores), teniendo así una escala de color azul que representa a las máximas láminas de agua aplicada (9,5 a 11 mm), y la escala de verde que representa a las láminas mínimas de agua aplicada (5,5 hasta aproximadamente 6,5 mm).

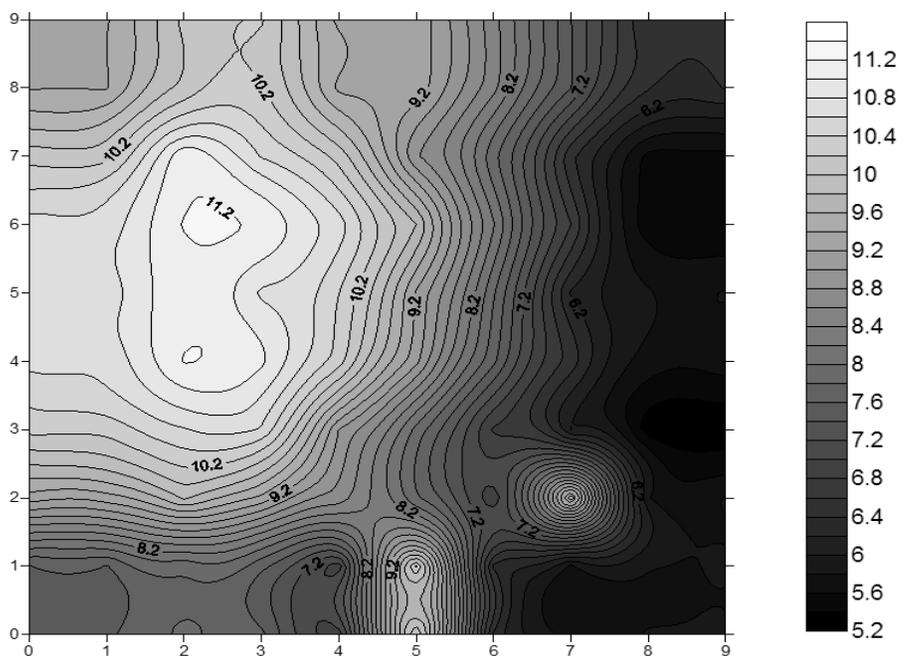
**Cuadro 12. Parámetros para la tercera evaluación del aspersor Xcel Wobbler**

CU %	EDa %	Pe	Pd	EA %
80,7	74,67	0,980	1	73,16

Fuente: Elaboración propia

Donde: **CU**: Coeficiente de Uniformidad; **EDa**: Eficiencia de distribución de agua; **Pe**: Proporción efectiva de agua que llega al suelo; **Pd**: Perdidas por fugas en conducción; **EA**: Eficiencia de Aplicación.

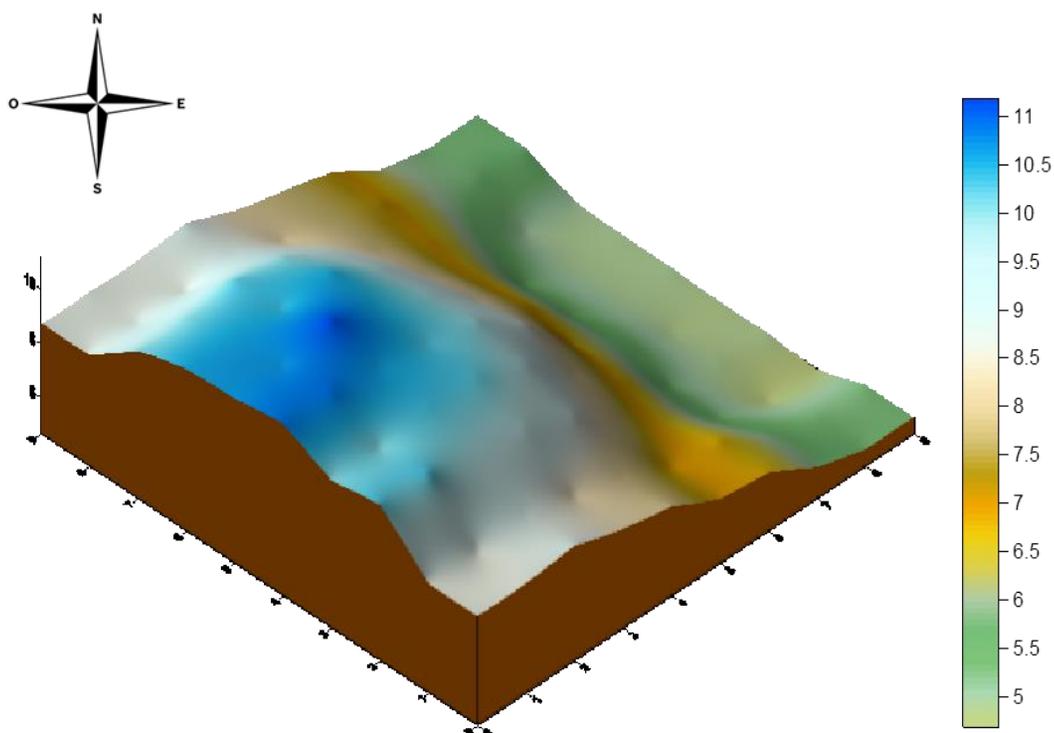
La EDa = 74,67%, junto a valores de Pe = 0,980 y Pd = 1; permiten determinar una EA = 73,16%, valor que indica que  $\frac{3}{4}$  partes de la parcela recibió este porcentaje del agua aplicada.



**Figura 27. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 80,7%**

En la figura 27, puede contemplarse la visualización espacial del área evaluada, conjuntamente con una escala de color (negro), donde las zonas con una tonalidad más clara señalan puntos con mayor lámina de agua aplicada (mm), presentándose con mayor incidencia, en la parte izquierda superior del área evaluada entre cuatro aspersores, debido al traslape o solapamiento entre ellos, y por otro lado las tonalidades oscuras de la escala, señalan puntos con un menor grado de lámina de agua aplicada, que generalmente están ubicadas en el extremo derecho. Obteniéndose láminas de agua entre los 5,2 a 11,2 mm. De esta manera con un Coeficiente de Uniformidad de 80,7%, llega a clasificarse como una uniformidad aceptable, según (Tarjuelo, 2005).

#### 4.4.1.4. Cuarta evaluación del aspersor Xcel Wobbler



**Figura 28. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 9 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 78,5 %, a una velocidad del viento de 0,7 m/s.**

La figura 28, corresponde a la pluviometría obtenida cuyos valores se muestran en el Anexo 8, obteniéndose un Coeficiente de Uniformidad de Christiansen de (78,5%), bajo la influencia del viento, siendo su incidencia durante la evaluación de 0.7 m/s, con una dirección de Sur a Oeste. Con una presión de trabajo entre 0.77 bares, en la figura también se muestra la altura de agua (mm) aplicada sobre la zona evaluada, es representada gráficamente en el espacio por diferentes colores (escala de colores), teniendo así una escala de color azul que representa a las máximas láminas de agua aplicada (9,5 a 11 mm), y la escala de verde que representa a las láminas mínimas de agua aplicada (5 hasta aproximadamente 6 mm).

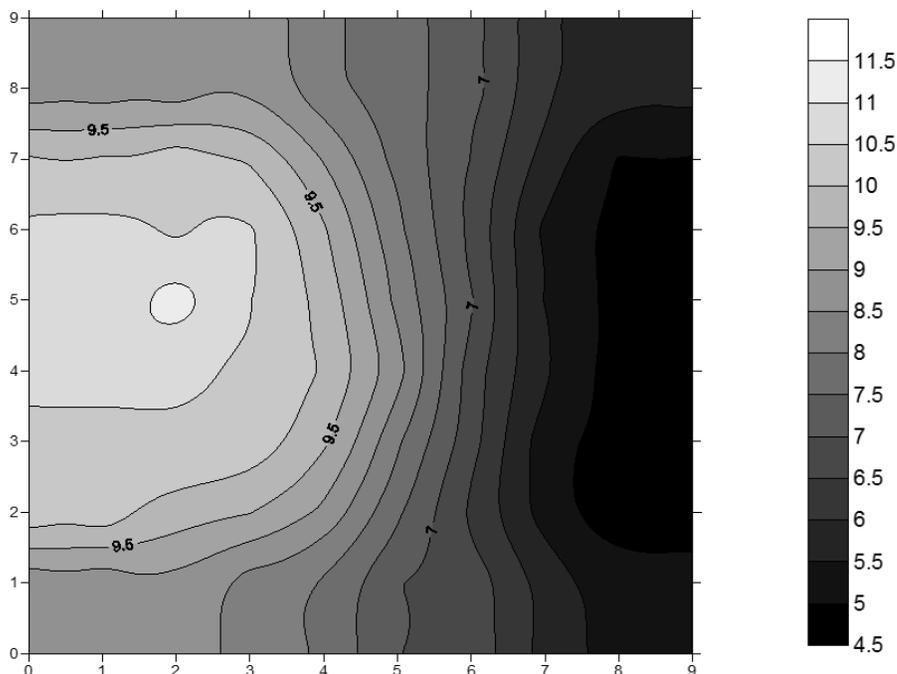
**Cuadro 13. Parámetros para la cuarta evaluación del aspersor Xcel Wobbler**

CU %	EDa %	Pe	Pd	EA %
78,5	71,78	0,980	1	70,33

Fuente: elaboración propia

Donde: **CU**: Coeficiente de Uniformidad; **EDa**: Eficiencia de distribución de agua; **Pe**: Proporción efectiva de agua que llega al suelo; **Pd**: Perdidas por fugas en conducción; **EA**: Eficiencia de Aplicación.

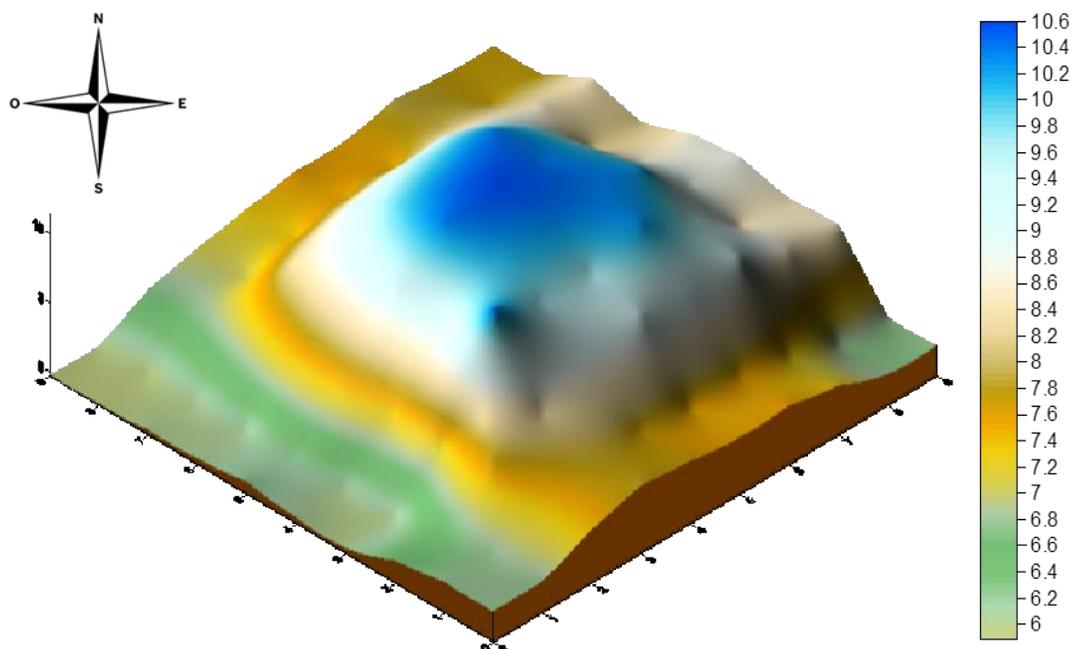
La EDa = 71,78%, junto a valores de Pe = 0,980 y Pd = 1; permiten determinar una EA = 70,33%, valor que indica que  $\frac{3}{4}$  partes de la parcela recibió este porcentaje del agua aplicada.



**Figura 29. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 78,5%**

En la figura 29, puede contemplarse la visualización espacial del área evaluada, conjuntamente con una escala de color (negro), donde las zonas con una tonalidad más clara señalan puntos con mayor lámina de agua aplicada (mm), y las tonalidades oscuras de la escala, señalan puntos con un menor grado de lámina de agua aplicada, que se encuentran ubicadas en el extremo derecho superior e inferior de la figura. Obteniéndose láminas de agua entre los 4,5 a 11,5 mm. Es de esta manera que el presente evento de riego, con un Coeficiente de Uniformidad de 78,5%, llega a clasificarse como una uniformidad aceptable. Según Pizarro (1996), la uniformidad en los riegos de alta frecuencia debe superar el 90 %, pero este valor se ve afectado por procesos ligados en función a las variaciones en la fabricación de los emisores y en ciertos casos a los diseños hidráulicos inadecuados.

#### 4.4.1.5. Quinta evaluación del aspersor Xcel Wobbler



**Figura 30. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 9 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 85,9 %, a una velocidad del viento de 0,4 m/s.**

En la figura 30, podemos observar la pluviometría, obteniéndose un Coeficiente de Uniformidad de Christiansen de (85,9%), cuyos valores se muestran en el Anexo 8, influenciado por el viento, con una incidencia de 0.4 m/s, con una dirección de sureste. Obteniéndose a determinadas características y una presión de trabajo entre 0.81 bares, la figura indica la altura de agua (mm) aplicada sobre la zona evaluada, representado por diferentes colores, teniendo así una escala de color azul que representa a las máximas láminas de agua aplicada (9 a 10,6 mm), y la escala de verde que representa a láminas mínimas de agua aplicada (6,2 a 6,8 mm aproximadamente).

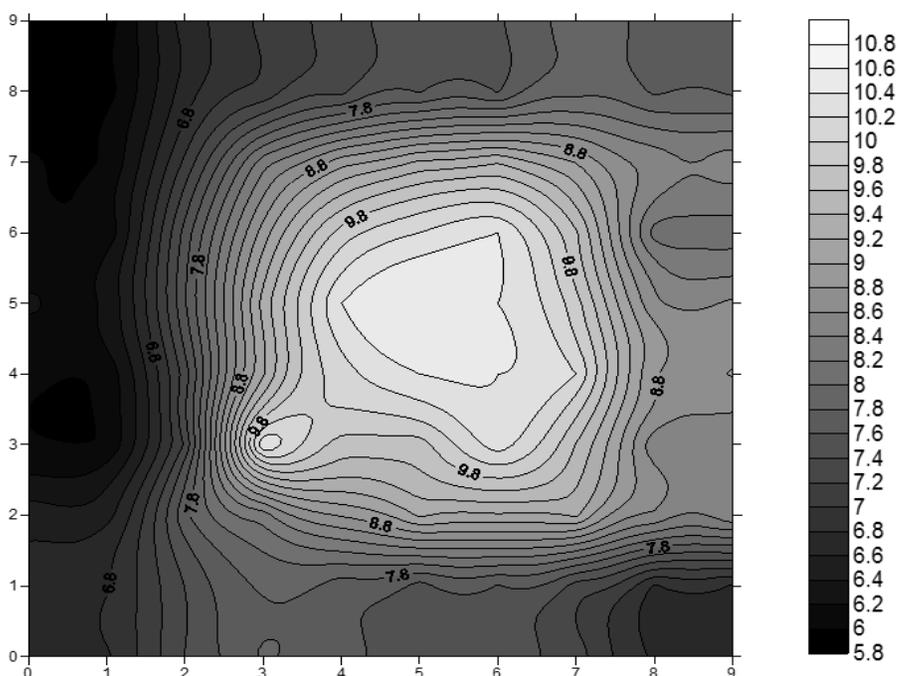
**Cuadro 14. Parámetros para la quinta evaluación del aspersor Xcel Wobbler**

CU %	EDa %	Pe	Pd	EA %
85,9	81,49	0,981	1	79,91

Fuente: Elaboración propia

**Donde:** **CU:** Coeficiente de Uniformidad; **EDa:** Eficiencia de distribución de agua; **Pe:** Proporción efectiva de agua que llega al suelo; **Pd:** Perdidas por fugas en conducción; **EA:** Eficiencia de Aplicación.

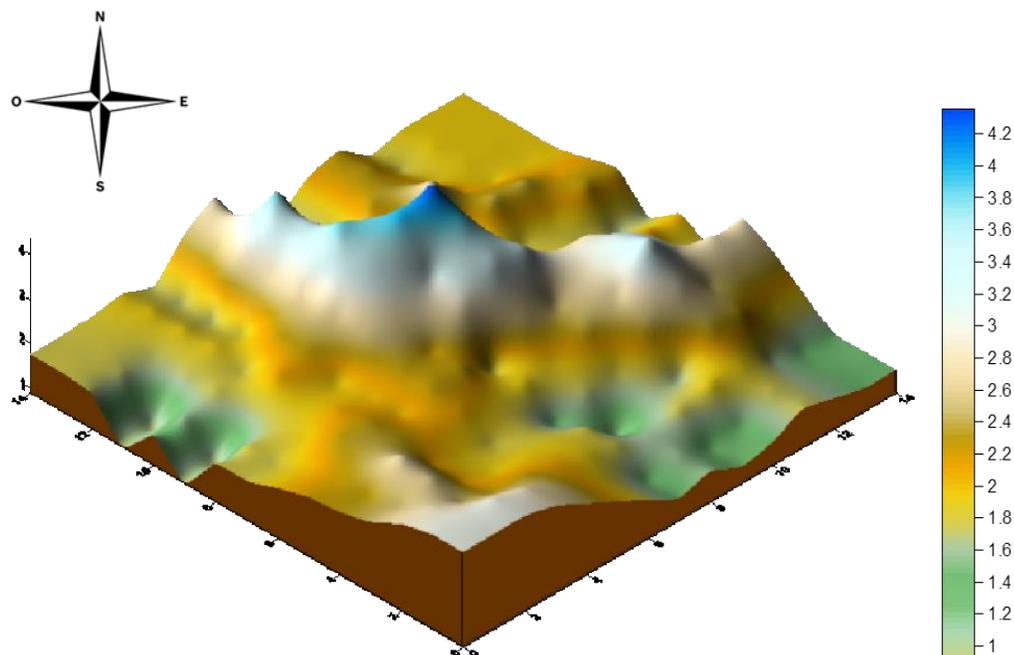
La EDa = 81,49%, junto a valores de Pe = 0,980 y Pd = 1; permiten determinar una EA = 79,91%, valor que indica que  $\frac{3}{4}$  partes de la parcela recibió este porcentaje del agua aplicada.



**Figura 31. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 85,9%**

En la figura 31, puede contemplarse la visualización espacial del área evaluada, conjuntamente con una escala de color (negro), donde las zonas con una tonalidad más clara señalan puntos con mayor lámina de agua aplicada (mm), y las tonalidades oscuras de la escala, señalan puntos con un menor grado de lámina de agua aplicada, que generalmente están ubicadas en los extremos. Obteniéndose láminas de agua entre los 5,8 a 10,8 mm aproximadamente. Es de esta manera que el presente evento de riego, con un Coeficiente de Uniformidad de 85,9%, según la clasificación mostrada en Tarjuelo (1999), valores de CU  $\geq 80$  son considerado buenos y valores CU  $< 80$  se consideran mejorables.

#### 4.4.1.6. Primera evaluación del aspersor 423 AG



**Figura 32. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 14 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 79,10 %, a una velocidad del viento de 0,8 m/s.**

En la figura 32, podemos observar la pluviometría, obteniéndose un Coeficiente de Uniformidad de Christiansen de (79,10%), cuyos valores se muestran en el Anexo 9, influenciado por el viento, con una incidencia de 0.8 m/s, con una dirección del Sur al Suroeste. Obteniéndose a determinadas características y una presión de trabajo entre 1.2 bares durante una hora, la figura indica que la altura de agua (mm) aplicada sobre la zona evaluada, representado por diferentes colores, teniendo así una escala de color azul que representa a las máximas láminas de agua aplicada (3,2 a 4,2 mm), y la escala de verde que representa a láminas mínimas de agua aplicada (1 a 1,4 mm aproximadamente).

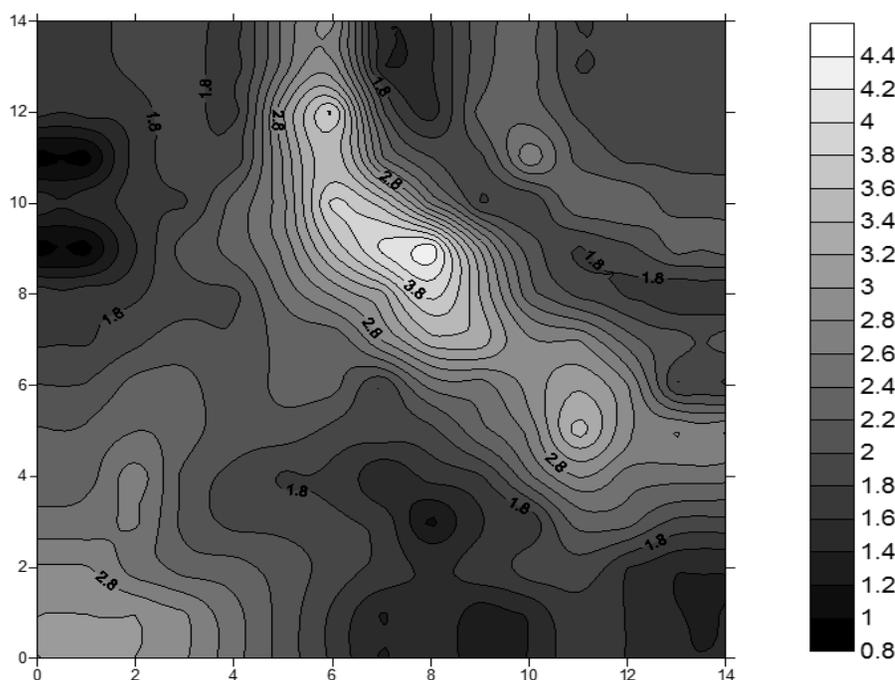
**Cuadro 15. Parámetros para la primera evaluación del aspersor 423 AG**

CU %	EDa %	Pe	Pd	EA %
79,10	72,57	0,980	1	71,11

Fuente: Elaboración propia

Donde: **CU**: Coeficiente de Uniformidad; **EDa**: Eficiencia de distribución de agua; **Pe**: Proporción efectiva de agua que llega al suelo; **Pd**: Perdidas por fugas en conducción; **EA**: Eficiencia de Aplicación.

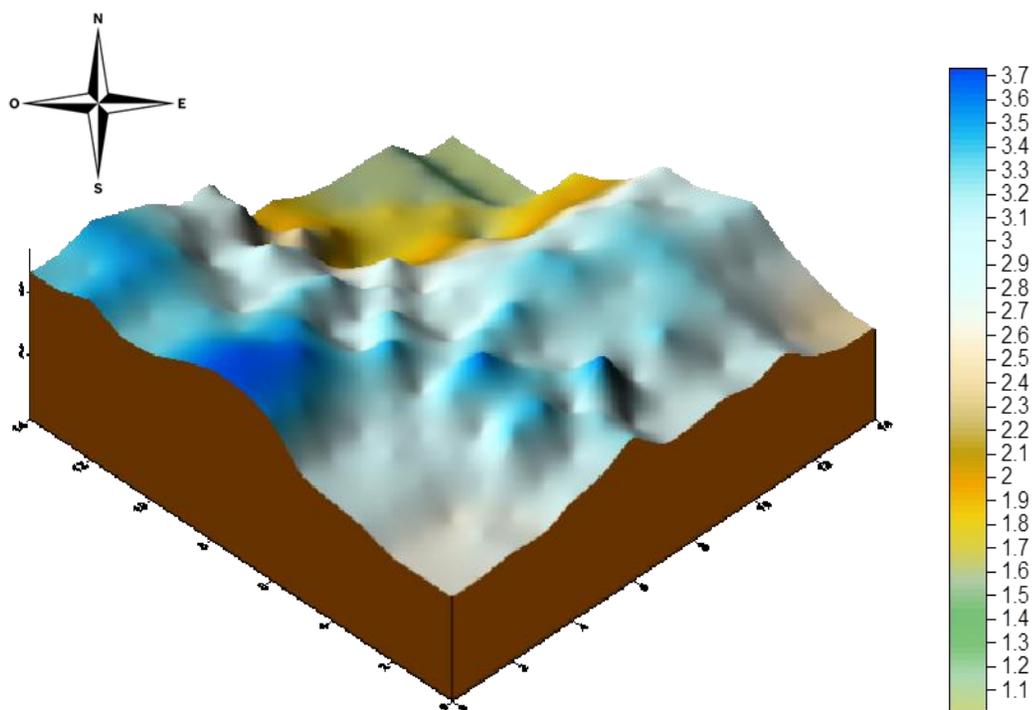
La EDa = 72,57%, junto a valores de Pe = 0,980 y Pd = 1; permiten determinar una EA = 71,11%, valor que indica que  $\frac{3}{4}$  partes de la parcela recibió este porcentaje del agua, tiende a clasificarse entre una uniformidad inaceptable a posiblemente aceptable, según el Servicio de Asesoramiento Regante, (2010), donde considera uniformidades inaceptables a valores inferiores al 70%.



**Figura 33. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 79,10%**

En la figura 33, puede contemplarse la visualización de curvas de nivel espacial del área evaluada, conjuntamente con una escala de color (negro), donde las zonas con una tonalidad más clara señalan puntos con mayor lámina de agua aplicada (mm), y las tonalidades oscuras de la escala, señalan puntos con un menor grado de lámina de agua aplicada, que generalmente están ubicadas en los extremos. Obteniéndose láminas de agua entre los 0,8 a 4,4 mm aproximadamente. Presentándose con mayor incidencia, en la zona central de lateral derecho. Poma (2014), señala que el diseño del riego igualmente es un factor importante, ya que al no estar bien diseñado afecta directamente en la uniformidad y eficiencia de aplicación.

#### 4.4.1.7. Segunda evaluación del aspersor 423 AG



**Figura 34. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 14 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 83,70 %, a una velocidad del viento de 0,8 m/s.**

En la figura 34, observamos los datos obtenidos mediante la pluviometría en la segunda evaluación, graficado tridimensionalmente mediante un simulador, utilizando el programa computacional (SURFER), donde nos permite apreciar la uniformidad de riego donde se aplican la lámina de agua en el área de evaluación.

La altura de agua (mm) aplicada sobre la zona evaluada, representado por diferentes colores, teniendo así una escala de color azul que representa a las máximas láminas de agua aplicada (2,8 a 3,7 mm), y la escala de verde que representa a láminas mínimas de agua aplicada (1,1 a 1,5 mm aproximadamente).

Obteniéndose un Coeficiente de Uniformidad de Christiansen de (83,70%), cuyos valores se muestran en el Anexo 9, Considerando los efectos del viento, es importante señalar que el registro de este durante la evaluación indica un arrastre con dirección al Sureste con una velocidad de 0,8 m/s, a mayor velocidad del viento la uniformidad reduce y a menor efecto

del viento la uniformidad se incrementa. Obteniéndose a determinadas características una presión de trabajo entre 1.8 bares durante una hora.

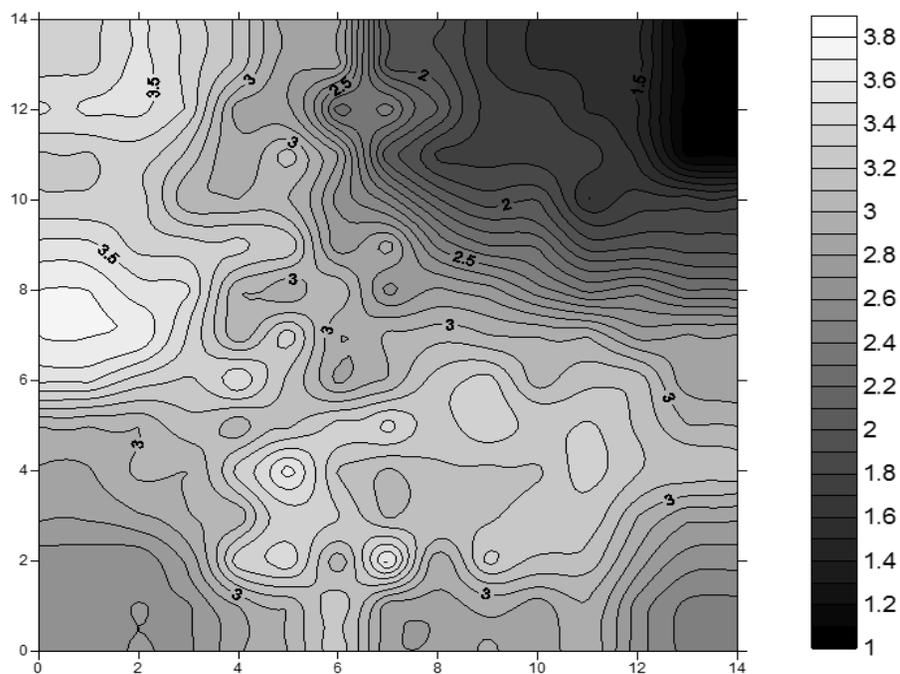
**Cuadro 16. Parámetros para la segunda evaluación del aspersor 423 AG**

CU %	EDa %	Pe	Pd	EA %
83,70	78,61	0,980	1	77,03

Fuente: Elaboración propia

**Donde:** **CU:** Coeficiente de Uniformidad; **EDa:** Eficiencia de distribución de agua; **Pe:** Proporción efectiva de agua que llega al suelo; **Pd:** Perdidas por fugas en conducción; **EA:** Eficiencia de Aplicación.

La EDa = 78,61%, junto a valores de Pe = 0,980 y Pd = 1; permiten determinar una EA = 77,03%, valor que indica que  $\frac{3}{4}$  partes de la parcela recibió este porcentaje del agua, tiende a clasificarse entre una uniformidad inaceptable a posiblemente aceptable, según el (Servicio de Asesoramiento Regante, (2010), donde considera uniformidades inaceptables a valores inferiores al 70%.



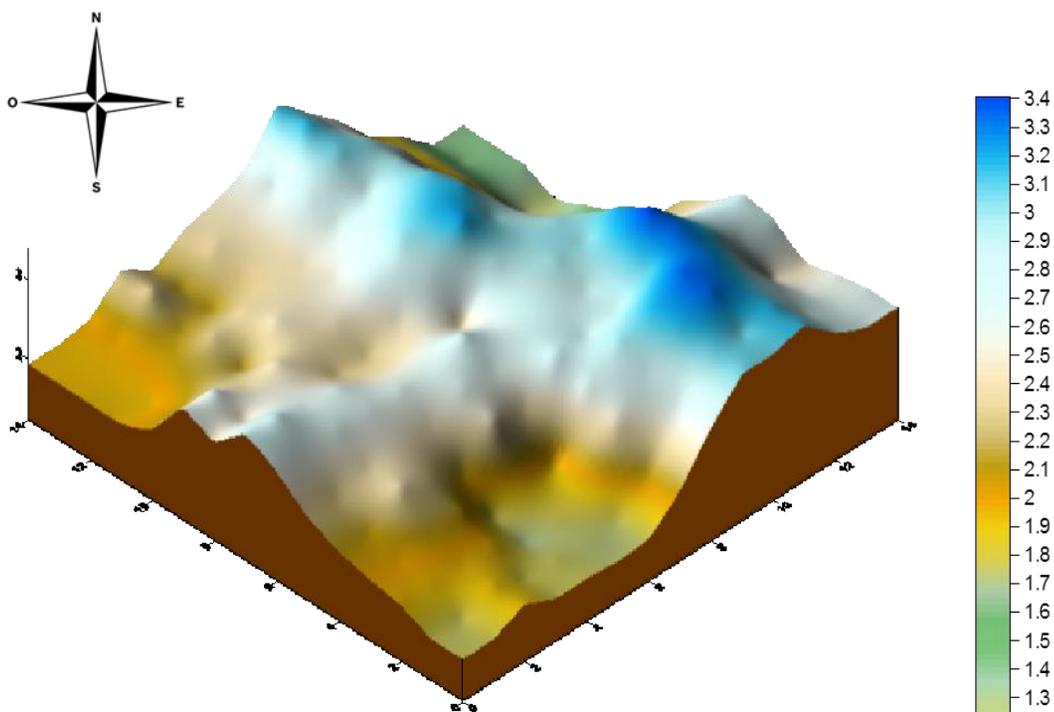
**Figura 35. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 83,70%**

En la figura 35, puede contemplarse la visualización de curvas de nivel espacial del área evaluada, conjuntamente con una escala de color (negro), donde las zonas con una tonalidad más clara señalan puntos con mayor lámina de agua aplicada (mm), y las tonalidades oscuras de la escala, señalan puntos con un menor grado de lámina de agua aplicada, que generalmente están ubicadas en los extremos. Obteniéndose láminas de agua entre los 1 a 3,8 mm aproximadamente. Presentándose con mayor incidencia, en la zona inferior de ambos laterales debido al solapamiento entre aspersores.

Los sectores donde las curvas de nivel están más separadas, demuestra que se presenta una distribución de agua más uniforme, lugares donde las curvas de nivel están más ceñidas, indica que hay un cambio brusco sobre la lámina de agua en el sector de riego, afectadas por la velocidad del viento o concentraciones del modelo de distribución de los aspersores llegando a disminuir la uniformidad de riego. Es de esta manera que, en la evaluación de riego se registra un Coeficiente de Uniformidad del 83,70%, considerando este valor, llega a clasificarse como una uniformidad aceptable.

Barboza y Mijahuanca (2023), sostienen que el efecto del viento, la evaporación y las pérdidas por filtración profunda y los elevadores de los aspersores al no estar instalados perpendicularmente al terreno influye en la uniformidad y eficiencia de aplicación, así como también las presiones de trabajo, que a mayor presión en los aspersores aumenta la uniformidad y la eficiencia de aplicación, debido a que esta influye en el índice de grosor de la gota, teniendo en cuenta que la presión esté dentro de la presión máxima de trabajo proporcionada por el fabricante.

#### 4.4.1.8. Tercera evaluación del aspersor 423 AG



**Figura 36. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 14 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 84,70 %, a una velocidad del viento de 0,8 m/s.**

En la figura 36, observamos los datos obtenidos mediante la pluviometría de la tercera evaluación, graficado tridimensionalmente mediante un simulador, utilizando el programa computacional (SURFER), donde nos permite apreciar la uniformidad de riego donde se aplican la lámina de agua en el área de evaluación.

La altura de agua (mm) aplicada sobre la zona evaluada, representado por diferentes colores, teniendo así una escala de color azul que representa a las máximas láminas de agua aplicada (2,7 a 3,4 mm), y la escala de verde que representa a láminas mínimas de agua aplicada (1,3 a 1,6 mm aproximadamente).

Obteniéndose un Coeficiente de Uniformidad de Christiansen de (84,70%), cuyos valores se muestran en el Anexo 9, Considerando los efectos del viento, es importante señalar que el registro de este durante la evaluación indica un arrastre con dirección al Sureste con una velocidad de 0,8 m/s, a mayor velocidad del viento la uniformidad reduce y a menor efecto

del viento la uniformidad se incrementa. Obteniéndose a determinadas características una presión de trabajo entre 1.5 bares durante una hora.

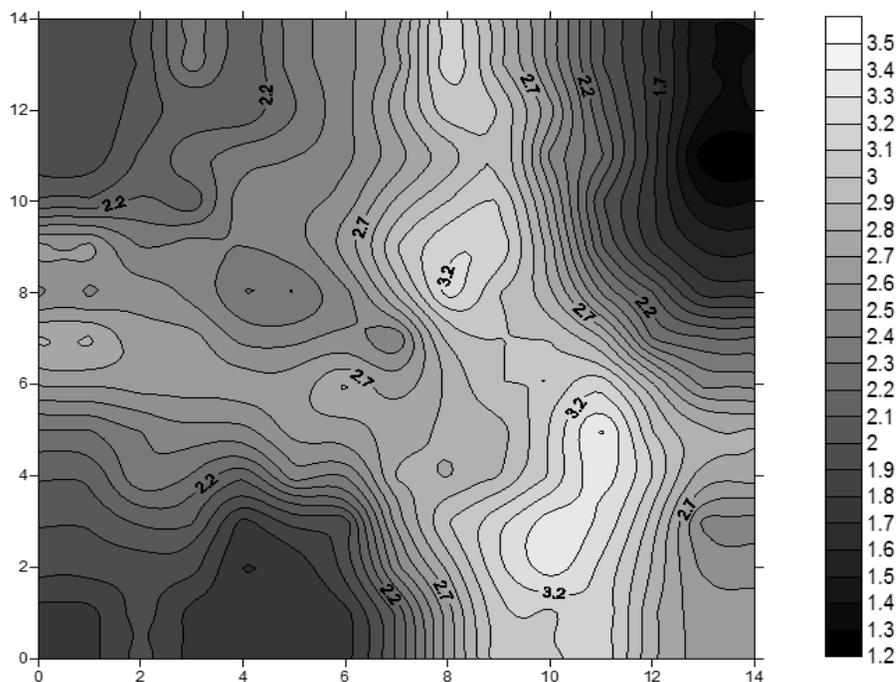
**Cuadro 17. Parámetros para la tercera evaluación del aspersor 423 AG**

CU %	EDa %	Pe	Pd	EA %
84,70	79,92	0,980	1	78,31

Fuente: Elaboración propia

**Donde:** **CU:** Coeficiente de Uniformidad; **EDa:** Eficiencia de distribución de agua; **Pe:** Proporción efectiva de agua que llega al suelo; **Pd:** Pérdidas por fugas en conducción; **EA:** Eficiencia de Aplicación.

La EDa = 79,92%, junto a valores de Pe = 0,980 y Pd = 1; permiten determinar una EA = 78,31%, valor que indica que  $\frac{3}{4}$  partes de la parcela recibió este porcentaje del agua, tiende a clasificarse entre una uniformidad inaceptable a posiblemente aceptable, según el Servicio de Asesoramiento Regante, (2010), donde considera uniformidades inaceptables a valores inferiores al 70%.



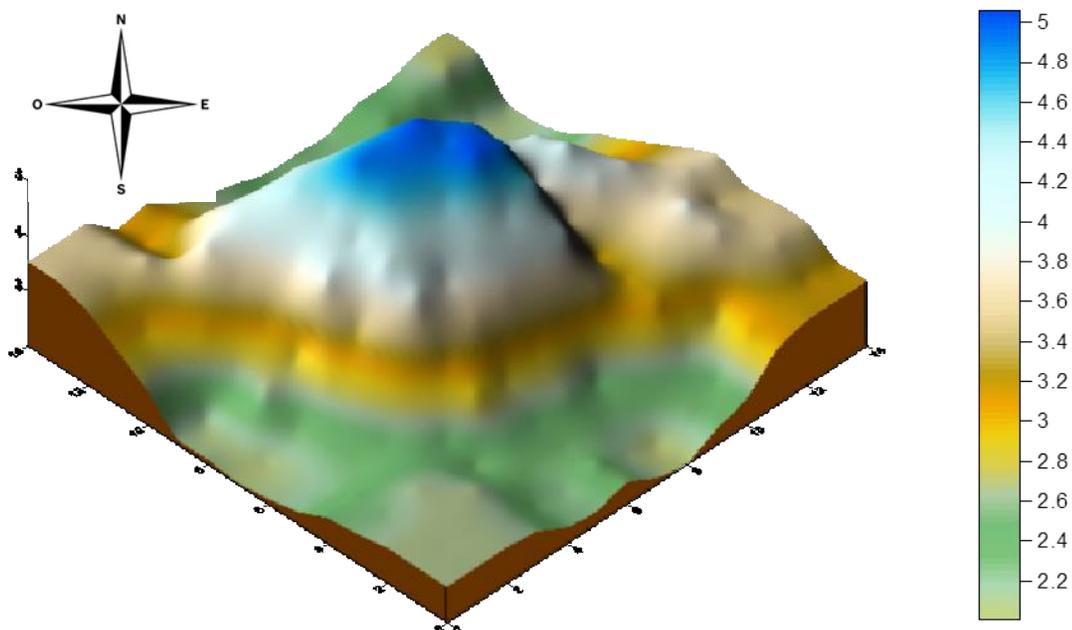
**Figura 37. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 84,70%**

En la figura 37, puede contemplarse la visualización de curvas de nivel espacial del área evaluada, conjuntamente con una escala de color (negro), donde las zonas con una tonalidad más clara señalan puntos con mayor lámina de agua aplicada (mm), y las tonalidades oscuras de la escala, señalan puntos con un menor grado de lámina de agua aplicada, que generalmente están ubicadas en los extremos. Obteniéndose láminas de agua entre los 1,2 a 3,5 mm aproximadamente. Presentándose con mayor incidencia, en la zona inferior del lateral derecho debido al solapamiento entre aspersores u arrastre por el viento.

Los sectores donde las curvas de nivel están más separadas, demuestra que se presenta una distribución de agua más uniforme, lugares donde las curvas de nivel están más ceñidas, indica que hay un cambio brusco sobre la lámina de agua en el sector de riego, afectadas por la velocidad del viento o concentraciones del modelo de distribución de los aspersores llegando a disminuir la uniformidad de riego. Es de esta manera que, en la evaluación de riego se registra un Coeficiente de Uniformidad del 84,70%.

El requerimiento de agua para lograr regar adecuadamente la parcela se incrementa significativamente; debiendo ser considerado este aspecto en la planificación e instalación de sistemas con el método de riego por aspersión (Paredes y Arragan, 2018).

#### 4.4.1.9. Cuarta evaluación del aspersor 423 AG



**Figura 38. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 14 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 79,00 %, a una velocidad del viento de 1,0 m/s.**

En la figura 38, observamos los datos obtenidos mediante la pluviometría de la tercera evaluación, graficado tridimensionalmente mediante un simulador, utilizando el programa computacional (SURFER), donde nos permite apreciar la uniformidad de riego donde se aplican la lámina de agua en el área de evaluación.

La altura de agua (mm) aplicada sobre la zona evaluada, representado por diferentes colores, teniendo así una escala de color azul que representa a las máximas láminas de agua aplicada (4 a 5 mm), y la escala de verde que representa a láminas mínimas de agua aplicada (2,2 a 2,6 mm aproximadamente).

Obteniéndose un Coeficiente de Uniformidad de Christiansen de (79,00%), cuyos valores se muestran en el Anexo 9, Considerando los efectos del viento, es importante señalar que el registro de este durante la evaluación indica un arrastre con dirección al Noreste con una velocidad de 1,0 m/s, a mayor velocidad del viento la uniformidad reduce y a menor efecto del viento la uniformidad se incrementa. Obteniéndose a determinadas características una presión de trabajo entre 1.9 bares durante una hora.

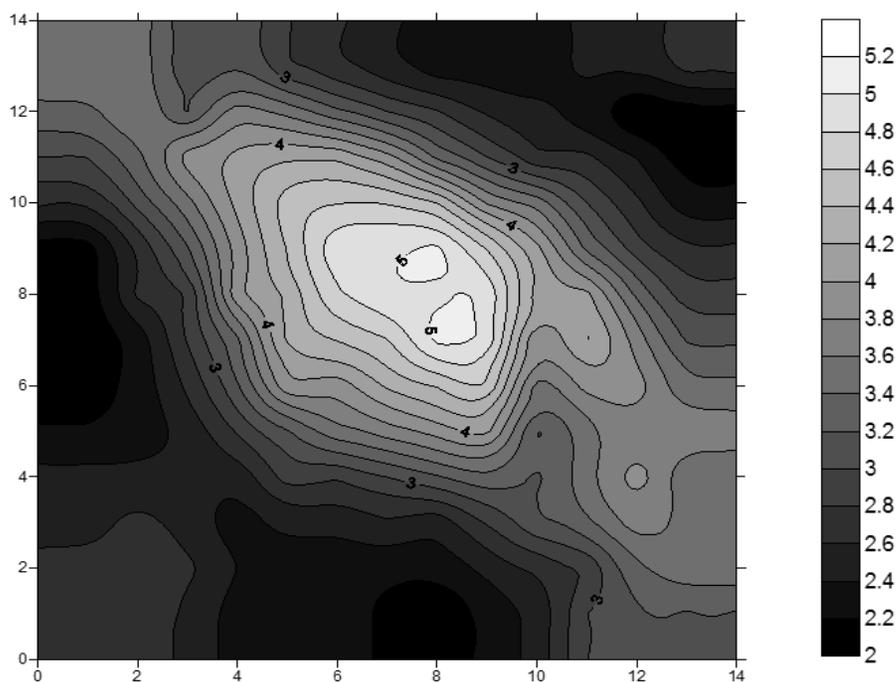
**Cuadro 18. Parámetros para la cuarta evaluación del aspersor 423 AG**

CU %	EDa %	Pe	Pd	EA %
79,00	72,44	0,979	1	70,95

Fuente: Elaboración propia

**Donde:** **CU:** Coeficiente de Uniformidad; **EDa:** Eficiencia de distribución de agua; **Pe:** Proporción efectiva de agua que llega al suelo; **Pd:** Perdidas por fugas en conducción; **EA:** Eficiencia de Aplicación.

La EDa = 72,44%, junto a valores de Pe = 0,979 y Pd = 1; permiten determinar una EA = 70,95%, valor que indica que  $\frac{3}{4}$  partes de la parcela recibió este porcentaje del agua, tiende a clasificarse entre una uniformidad inaceptable a posiblemente aceptable, según el Servicio de Asesoramiento Regante, (2010), donde considera uniformidades inaceptables a valores inferiores al 70%.

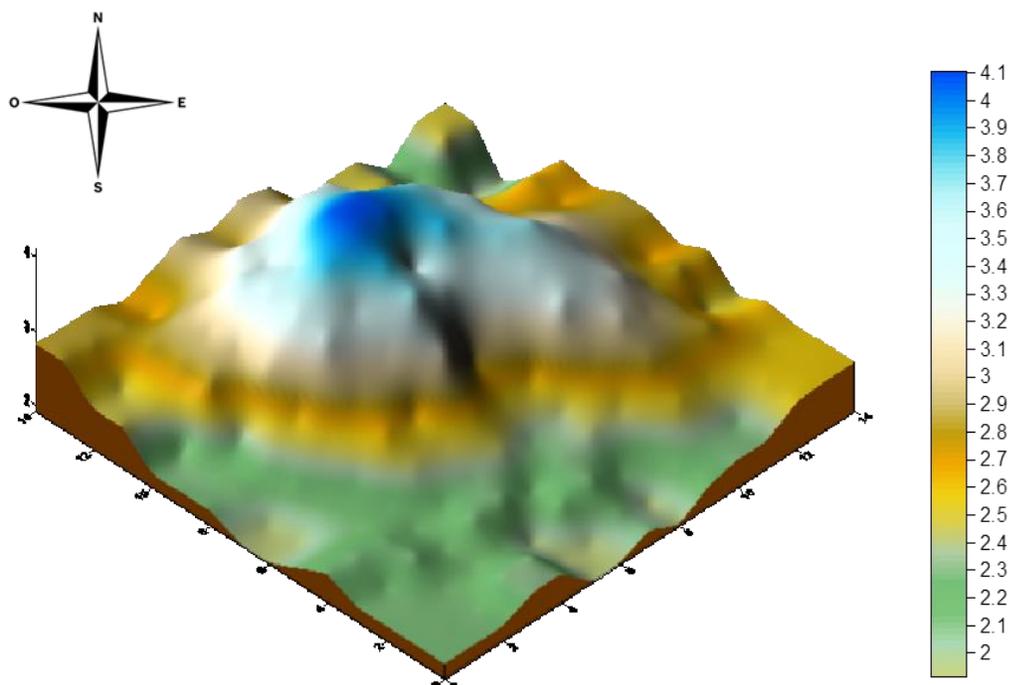


**Figura 39. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 79,00%**

En la figura 39, puede contemplarse la visualización de curvas de nivel espacial del área evaluada, conjuntamente con una escala de color (negro), donde las zonas con una tonalidad más clara señalan puntos con mayor lámina de agua aplicada (mm), y las tonalidades oscuras de la escala, señalan puntos con un menor grado de lámina de agua aplicada, que generalmente están ubicadas en los extremos. Obteniéndose láminas de agua entre los 2 a 5,2 mm aproximadamente. Presentándose con mayor incidencia, en la zona central del área de evaluación debido al solapamiento entre aspersores u arrastre por el viento.

Los sectores donde las curvas de nivel están más separadas, demuestra que se presenta una distribución de agua más uniforme, lugares donde las curvas de nivel están más ceñidas, indica que hay un cambio brusco sobre la lámina de agua en el sector de riego, afectadas por la velocidad del viento o concentraciones del modelo de distribución de los aspersores llegando a disminuir la uniformidad de riego. Es de esta manera que, en la evaluación de riego se registra un Coeficiente de Uniformidad del 79,00%, considerando este valor, llega a clasificarse como una uniformidad aceptable según el Servicio de Asesoramiento Regante (2010) citado por Guarachi (2013).

#### 4.4.1.10. Quinta evaluación del aspersor 423 AG



**Figura 40. Representación tridimensional de la pluviometría (mm), resultante del solapamiento de 4 aspersores, a una distancia de 14 m, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 83,00 %, a una velocidad del viento de 1,0 m/s.**

En la figura 40, observamos los datos obtenidos mediante la pluviometría de la tercera evaluación, graficado tridimensionalmente mediante un simulador, utilizando el programa computacional (SURFER), donde nos permite apreciar la uniformidad de riego donde se aplican la lámina de agua en el área de evaluación.

La altura de agua (mm) aplicada sobre la zona evaluada, representado por diferentes colores, teniendo así una escala de color azul que representa a las máximas láminas de agua aplicada (3,4 a 4,1 mm), y la escala de verde que representa a láminas mínimas de agua aplicada (2,1 a 2,3 mm aproximadamente).

Obteniéndose un Coeficiente de Uniformidad de Christiansen de (83,00%), cuyos valores se muestran en el Anexo 9, Considerando los efectos del viento, es importante señalar que el registro de este durante la evaluación indica un arrastre con dirección al Noreste con una velocidad de 1,0 m/s, a mayor velocidad del viento la uniformidad reduce y a menor efecto

del viento la uniformidad se incrementa. Obteniéndose a determinadas características una presión de trabajo entre 1.8 bares durante una hora.

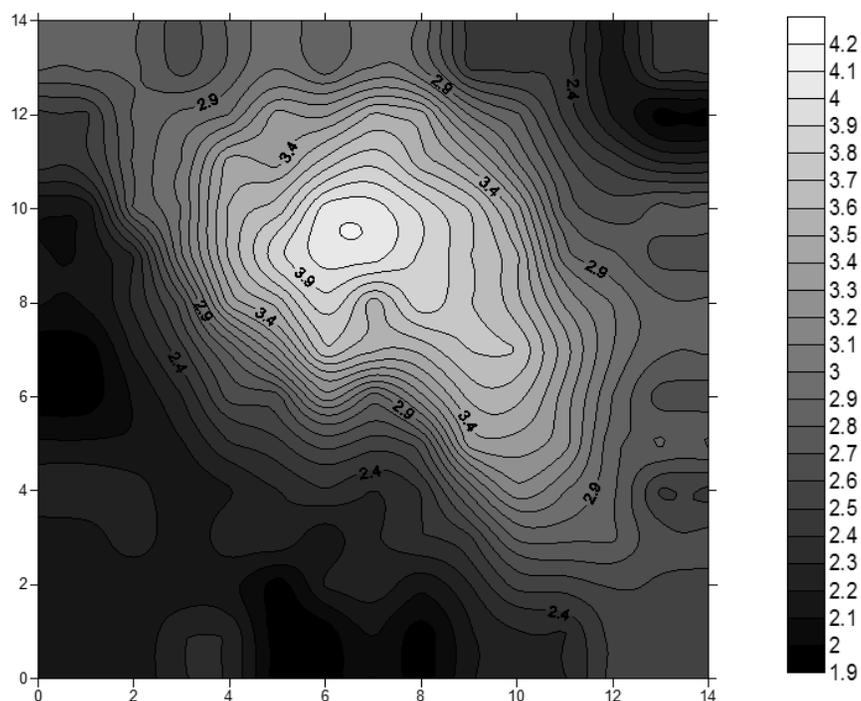
**Cuadro 19. Parámetros para la quinta evaluación del aspersor 423 AG**

CU %	EDa %	Pe	Pd	EA %
83,00	77,69	0,979	1	76,09

Fuente: Elaboración propia

**Donde:** **CU:** Coeficiente de Uniformidad; **EDa:** Eficiencia de distribución de agua; **Pe:** Proporción efectiva de agua que llega al suelo; **Pd:** Perdidas por fugas en conducción; **EA:** Eficiencia de Aplicación.

La EDa = 77,69%, junto a valores de Pe = 0,979 y Pd = 1; permiten determinar una EA = 76,09%, valor que indica que  $\frac{3}{4}$  partes de la parcela recibió este porcentaje del agua, tiende a clasificarse entre una uniformidad inaceptable a posiblemente aceptable, según el (Servicio de Asesoramiento Regante, (2010), donde considera uniformidades inaceptables a valores inferiores al 70%.



**Figura 41. Visualización del área evaluada, señalando las zonas con mayor y menor altura de agua aplicada (mm), obteniendo un CU de 83,00%**

En la figura 41, puede contemplarse la visualización de curvas de nivel espacial del área evaluada, conjuntamente con una escala de color (negro), donde las zonas con una tonalidad más clara señalan puntos con mayor lámina de agua aplicada (mm), y las tonalidades oscuras de la escala, señalan puntos con un menor grado de lámina de agua aplicada, que generalmente están ubicadas en los extremos. Obteniéndose láminas de agua entre los 1,9 a 4,2 mm aproximadamente. Presentándose con mayor incidencia, en la zona superior central del área de evaluación debido al solapamiento entre aspersores u arrastre por el viento.

Los sectores donde las curvas de nivel están más separadas, demuestra que se presenta una distribución de agua más uniforme, lugares donde las curvas de nivel están más ceñidas, indica que hay un cambio brusco sobre la lámina de agua en el sector de riego, afectadas por la velocidad del viento o concentraciones del modelo de distribución de los aspersores llegando a disminuir la uniformidad de riego. Es de esta manera que, en la evaluación de riego se registra un Coeficiente de Uniformidad del 83,00%, considerando este valor, llega a clasificarse como una uniformidad aceptable.

A dichos valores obtenidos de CU, expresando en términos de valor numérico, la uniformidad existente en el área de riego, en todas las evaluaciones realizadas y señalados en el Anexo 9, bajo diferentes diseños e incidencias del viento, Revilla (2010), señala que en riego por aspersión se estima que los coeficientes de uniformidad (CU) deben ser los siguientes: para frutales o forrajeras con sistema radical profundo deben estar entre 70 al 82%, en cultivos extensivos con sistema radical de profundidad media deben encontrarse entre el 82 al 88%.

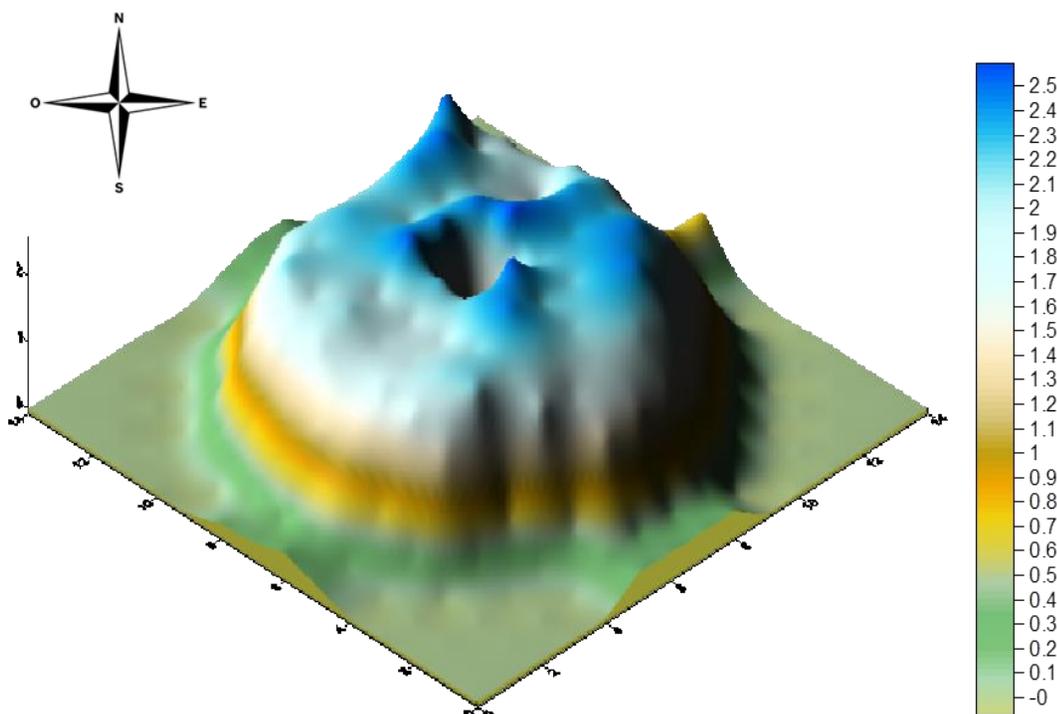
#### **4.4.2. Evaluación de un solo aspersor**

El uso de programas nos permita realizar simulaciones, mediante los datos obtenidos de la evaluación de un solo aspersor, en este caso el programa empleado fue el Microsoft Excel, que nos facilita traslapar, valores de evaluaciones realizadas tomando un solo aspersor, mediante modelos matemáticos adecuados y mostrarlos tridimensionalmente, para su mejor comprensión.

El uso del programa Excel, el cual, mediante simulaciones, nos permite obtener valores de la uniformidad a determinados marcos de riego, permitiéndonos seleccionar los mejores espaciamientos.

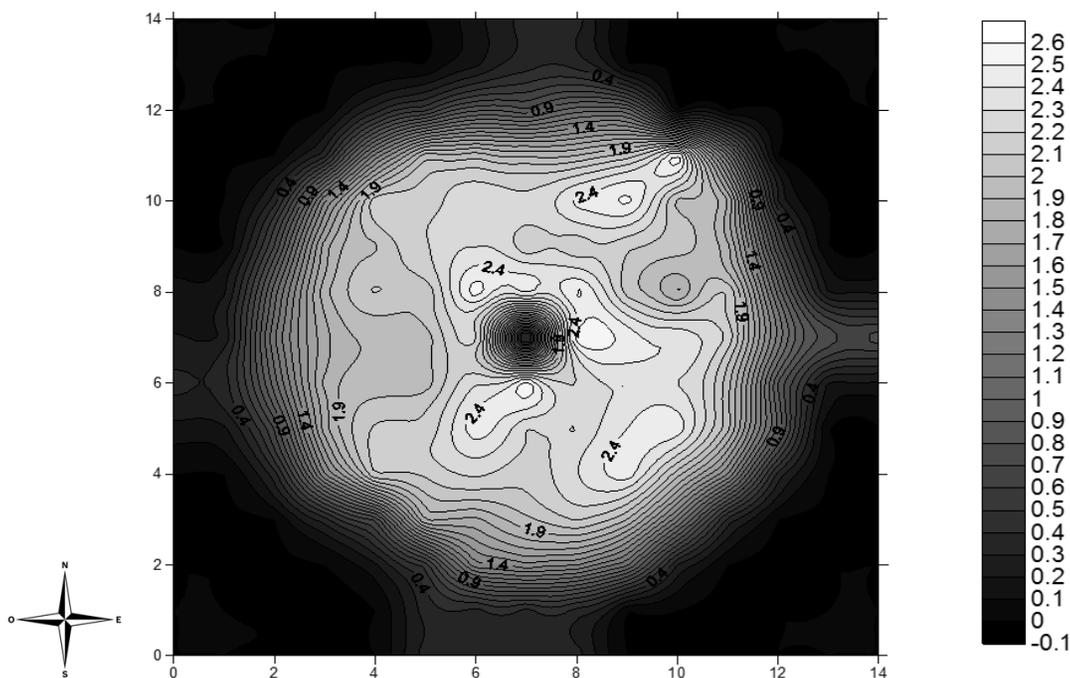
Para obtener dichos valores mediante el programa, es preciso realizar evaluaciones de un solo aspersor, es decir obtener la pluviometría generada por un aspersor.

Para realizar la prueba de pluviometría de un aspersor, se emplearon los aspersores Xcel Wobbler y 423 AG ya que estos mediante pruebas realizadas, descritas y estudiadas anteriormente llegaron a obtener valores de uniformidad altas, debido al diseño del aspersor.



**Figura 42. Representación gráfica tridimensional de la pluviometría (mm), obtenida de un aspersor Xcel Wobbler al aire libre, bajo una incidencia del viento de 0,83 m/s**

Los datos obtenidos en una de las pruebas de pluviometría (ml), y transformados en términos de láminas de agua (mm), fueron representados gráficamente, mediante el programa SURFER, como puede ser observado en la figura 42, donde nos permite apreciar claramente como el aspersor Xcel Wobbler aplica el agua sobre la zona evaluada, gracias a la red de pluviómetros, distanciados a 2 x 2 m. instalados alrededor del aspersor, abarcando todo el diámetro mojado. A esto es importante señalar que la presión de trabajo empleado durante la evaluación (60 min), fue de 1,4 bar, desfogando un caudal de 0.198 l/s, a una altura del aspersor sobre la superficie de 1 m y bajo una incidencia del viento de 0,83 m/s, con una dirección del viento al noreste.

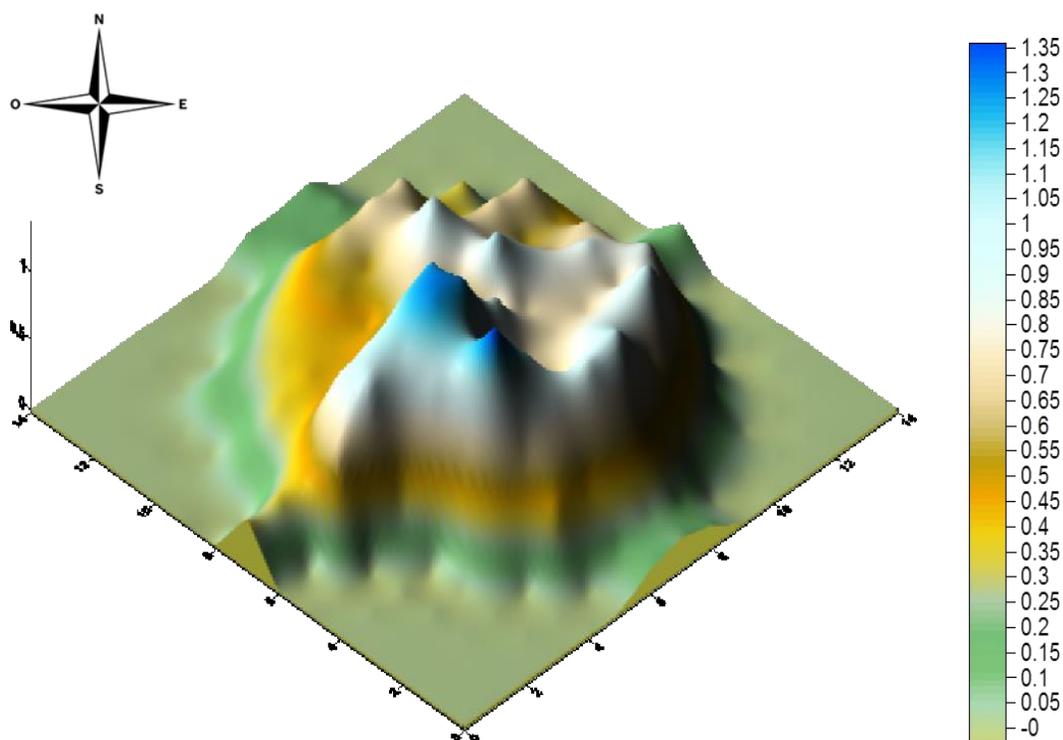


**Figura 43. Visualización espacial del área evaluada, en cuanto a la forma de reparto de agua, señalando las zonas con mayor y menor lámina de agua aplicada (mm)**

En la figura 43, se puede observar la visualización espacial del área evaluada en cuanto a la forma de reparto de agua, conjuntamente con una escala de color (negro), donde las zonas con una tonalidad más clara señalan puntos con mayor lámina de agua aplicada (mm), siendo su mayor incidencia, en forma de rosca alrededor del aspersor y por otro lado las tonalidades oscuras de la escala, señalan puntos con un menor grado de lámina de agua aplicada, que generalmente están ubicadas en las periferias de la red de pluviómetros, obteniéndose láminas de agua entre los -0.1 a 2.6 mm.

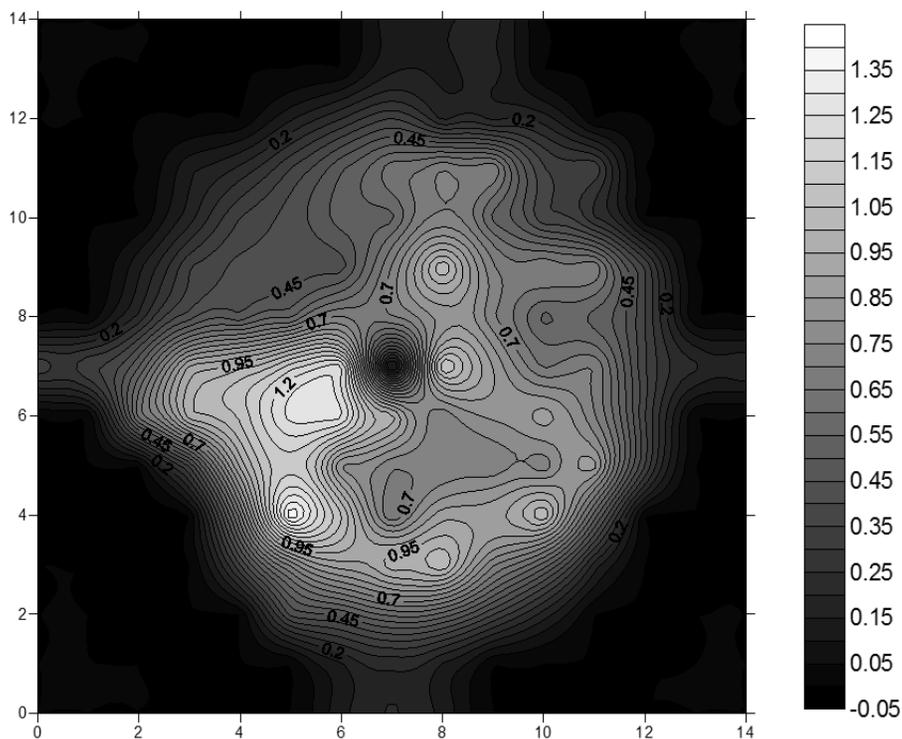
El programa SURFER nos permite interpolar los datos obtenidos en los pluviómetros y presentarlos como curvas de nivel, lo que hace posible visualizar la espacialidad de los datos, donde las curvas que están muy separadas, corresponden a pendientes suaves, por otro lado, las curvas que se encuentran muy juntas, señalan una pendiente muy inclinada y, por último, un espaciamiento uniforme y paralelo indica una pendiente constante. Lo que se trata de indicar con esto es, que en las zonas donde se presentan pendientes suaves, indican un cambio leve en las láminas aplicadas de agua, por otro lado, en las zonas con pendientes muy inclinadas, señalan el cambio brusco en las láminas aplicadas de agua y,

una pendiente constante y paralela en determinadas zonas, indica una mayor uniformidad en las láminas de agua.



**Figura 44. Representación gráfica tridimensional de la pluviometría (mm), obtenida de un aspersor 423 AG al aire libre, bajo una incidencia del viento de 0,83 m/s**

Los datos obtenidos en una de las pruebas de pluviometría (ml), y transformados en términos de láminas de agua (mm), fueron representados gráficamente, mediante el programa SURFER, como puede ser observado en la figura 44, donde nos permite apreciar claramente como el aspersor 423 AG aplica el agua sobre la zona evaluada, gracias a la red de pluviómetros, distanciados a 2 x 2 m. instalados alrededor del aspersor, abarcando todo el diámetro mojado. A esto es importante señalar que la presión de trabajo empleado durante la evaluación (60 min), fue de 1,3 bar, desfogando un caudal de 0.19 l/s, a una altura del aspersor sobre la superficie de 1 m y bajo una incidencia del viento de 0,83 m/s, con una dirección del viento de Este a Oeste.



**Figura 45. Visualización espacial del área evaluada, en cuanto a la forma de reparto de agua, señalando las zonas con mayor y menor lámina de agua aplicada (mm)**

El programa SURFER nos permite interpolar los datos obtenidos en los pluviómetros y presentarlos como curvas de nivel, lo que hace posible visualizar la espacialidad de los datos, donde las curvas que están muy separadas, corresponden a pendientes suaves, por otro lado, las curvas que se encuentran muy juntas, señalan una pendiente muy inclinada.

En la figura 45, se puede observar la visualización espacial del área evaluada en cuanto a la forma de reparto de agua, conjuntamente con una escala de color (negro), donde las zonas con una tonalidad más clara señalan puntos con mayor lámina de agua aplicada (mm), siendo su mayor incidencia, alrededor del aspersor y por otro lado las tonalidades oscuras de la escala, señalan puntos con un menor grado de lámina de agua aplicada, que generalmente están ubicadas en las periferias de la red de pluviómetros, obteniéndose láminas de agua entre los -0.01 a 1.35 mm.

Otro aspecto importante como se indicaba anteriormente, es la influencia del viento sobre el reparto de agua lanzado por el aspersor, donde en la figura claramente puede notarse,

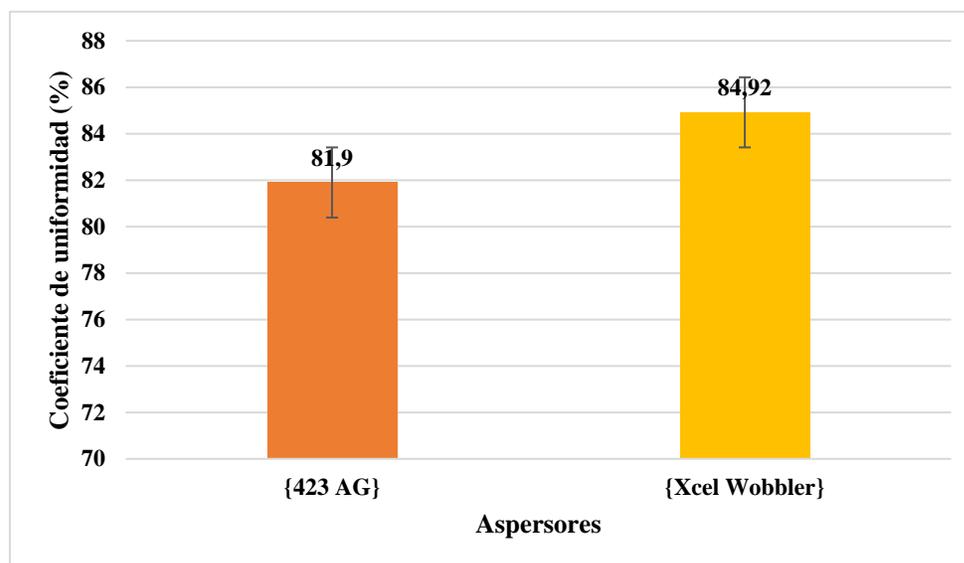
que las láminas aplicadas se extienden con mayor incidencia hacia la dirección del viento, a la vez provocando el incremento del radio mojado debido a la influencia del viento, llegando a justificar de esta manera el incremento y la disminución del radio mojado.

#### 4.4.3. Coeficiente de uniformidad (CU%)

Se efectuaron los análisis empleando Hojas de cálculo de la fórmula de Christiansen para determinar el Coeficiente de Uniformidad. Es importante señalar que la evaluación de riego por aspersión se basa principalmente en la obtención de la uniformidad y su eficiencia.

**Cuadro 20. Medias t de Student para coeficiente de uniformidad**

Tipo de aspersor	Promedio	n	p-valor
423 AG	81,9	5	0,2818
Xcel Wobbler	84,92	5	



**Figura 46. Medias t de Student para coeficiente de uniformidad**

La Figura 46, muestra la prueba de t de Student, en el cual se aprecia las medias de la variable coeficiente de uniformidad de los dos aspersores en estudio, donde no se muestran evidencias significativas entre aspersores ( $p > 0,05$ ), de tal manera se puede indicar que ambos aspersores son estadísticamente iguales en términos de la variable.

Por lo tanto, los valores obtenidos de CU, expresando en términos de valor numérico, la uniformidad existente en el área de riego, en todas las evaluaciones realizadas, Revilla (2010), señala que en riego por aspersión se estima que los coeficientes de uniformidad (CU) deben ser los siguientes: para frutales o forrajeras con sistema radical profundo deben estar entre 70 al 82%, en cultivos extensivos con sistema radical de profundidad media deben encontrarse entre el 82 al 88%.

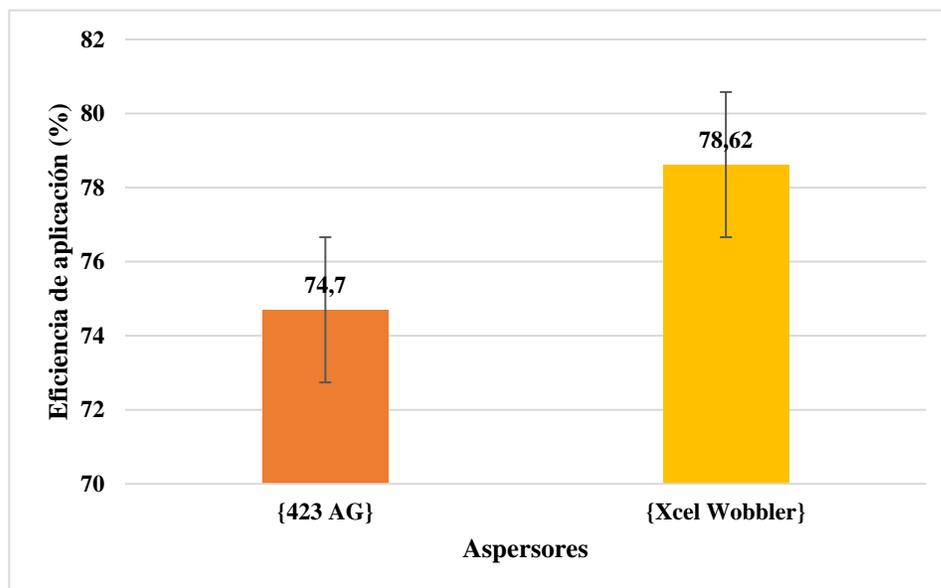
Tarjuelo (1999), argumenta que la aplicación uniforme del agua en la superficie depende principalmente de: el “modelo” de reparto de agua del aspersor, así como de la disposición y el espaciamiento de los aspersores en campo (marco de riego), donde el reparto de agua del aspersor viene definido por el propio diseño del aspersor, el tipo y número de boquillas y la presión de trabajo. A estos factores hay que añadir otro, que es el viento (principal distorsionador de la uniformidad de reparto), y a estos factores pueden añadirse otros de menor trascendencia como la altura del aspersor sobre el terreno.

#### 4.4.4. Eficiencia de aplicación (EA%)

Se determino los valores de la eficiencia de aplicación en los diferentes periodos de riego, este parámetro es el que determina el destino del agua o el porcentaje de aplicación a la parcela.

**Cuadro 21. Medias t de Student para eficiencia de aplicación**

Tipo de aspersor	Promedio	n	p-valor
423 AG	74,7	5	0,279
Xcel Wobbler	78,62	5	



**Figura 47. Medias t de Student para eficiencia de aplicación**

En la Figura 47, se presenta la prueba t de Student, donde se comparan las medias de eficiencia de aplicación de los dos aspersores en estudio. Los resultados indican que no hay diferencias significativas entre los aspersores ( $p > 0,05$ ), lo que sugiere que ambos son estadísticamente iguales en cuanto a esta variable.

Es importante señalar que una eficiencia del 78,62% del aspersor Xcel Wobbler indica que, del total del agua bombeada por un pozo, sólo el 78,62 % estaría disponible para ser aprovechado por las plantas y el 21,38% restante tendría destinos diferentes, lo cual es interpretado de mejor manera como pérdidas, de los que podemos destacar a: las pérdidas de aplicación ocasionados principalmente por el viento. En comparación a la Eficiencia de Riego del aspersor 423 AG que presento un promedio de evaluación de 74,7%, con un 25.3% por perdidas en el riego por aspersión, debido a una alta velocidad del viento, grosor de las gotas emitidas por los aspersores y otros factores.

La eficiencia de aplicación es el tanto por ciento del agua de riego que es realmente utilizada por el cultivo con respecto al total de agua aplicada, para lo cual hay que considerar las pérdidas de agua originadas por filtración profunda y las pérdidas por escorrentía, donde en el riego por aspersión, la escorrentía suele ser nula cuando el sistema está bien diseñado y no se producen fugas, pero en cambio es preciso incluir las pérdidas por evaporación y arrastre del viento.

## 4.5. Simulación de riego por aspersión

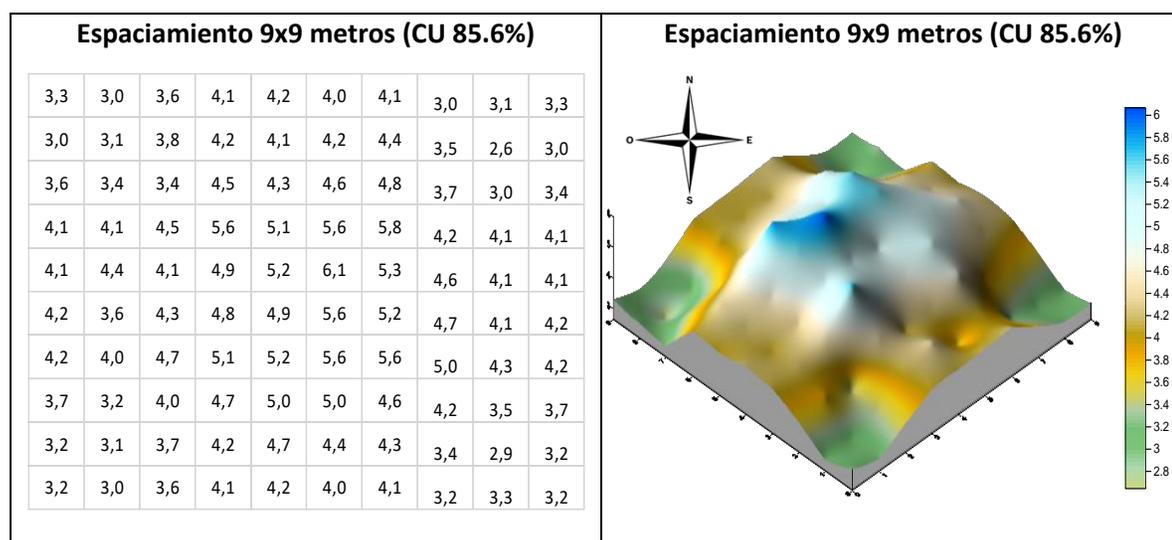
### 4.5.1. Simulación de riego para el aspersor Xcel Wobbler

La simulación con el aspersor Xcel Wobbler permitió evaluar diferentes diseños, identificando aquellos que logran una mayor uniformidad en la aplicación del agua. Esto es fundamental para mejorar la eficiencia del riego optimizando el uso del recurso hídrico.

El cuadro 23, muestra los resultados de la simulación del riego por aspersión (Anexo 10) para 5 espaciamientos diferentes:

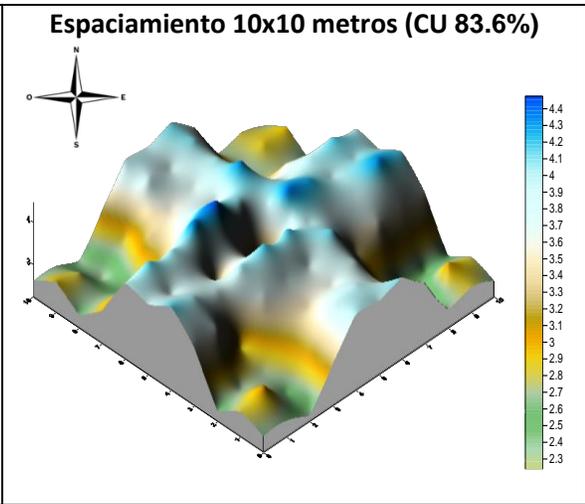
**Cuadro 22. Parámetro (Coeficiente de Uniformidad) del riego por aspersión para el aspersor Xcel Wobbler**

Marco cuadrado (%)	Espaciamiento	Coeficiente de uniformidad (%)
50	9 x 9	85,6
55	10 x 10	83,6
60	11 x 11	84,3
65	12 x 12	83,4
70	13 x 13	80,4



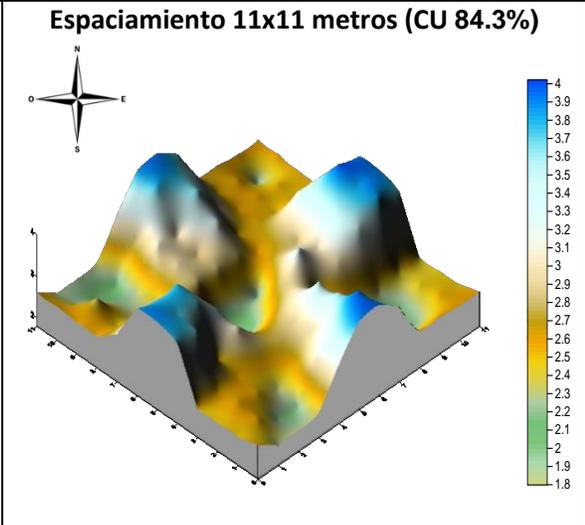
**Espaciamiento 10x10 metros (CU 83.6%)**

2,6	2,8	2,5	3,6	4,2	3,9	4,0	3,0	2,5	3,0	2,6
2,6	3,1	2,6	3,7	4,1	3,7	4,2	3,2	2,6	2,8	2,6
2,4	2,5	2,7	2,9	3,8	3,8	4,1	2,8	2,5	2,3	2,4
3,2	3,1	3,2	3,6	4,1	3,2	4,4	3,4	3,3	2,8	3,2
4,0	3,9	3,5	3,7	4,2	3,6	4,5	3,9	3,5	3,9	4,0
4,0	4,0	3,6	3,7	4,2	2,4	4,1	3,7	3,7	3,8	4,0
4,2	3,6	3,8	4,2	4,0	4,4	4,1	4,4	4,1	4,1	4,2
3,7	3,1	2,9	3,3	3,9	4,3	3,9	3,4	3,3	3,4	3,7
2,7	2,2	2,4	3,5	4,0	4,0	4,0	3,6	2,8	2,6	2,7
2,8	3,1	2,5	3,5	4,4	4,0	4,2	3,2	2,7	2,9	2,8
2,6	2,8	2,5	3,6	4,2	3,9	4,0	3,0	2,5	3,0	2,6



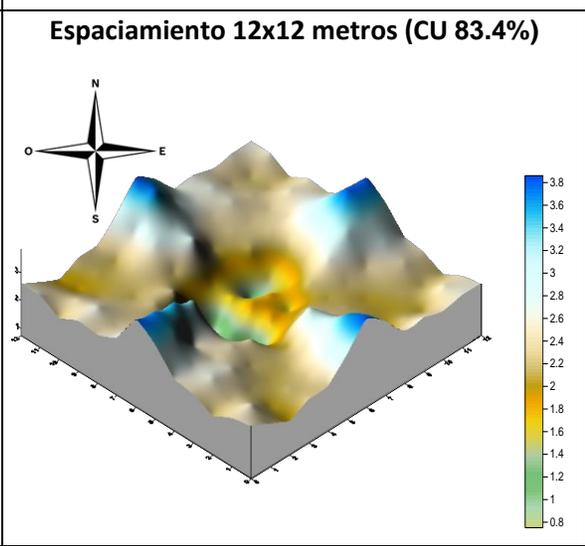
**Espaciamiento 11x11 metros (CU 84.3%)**

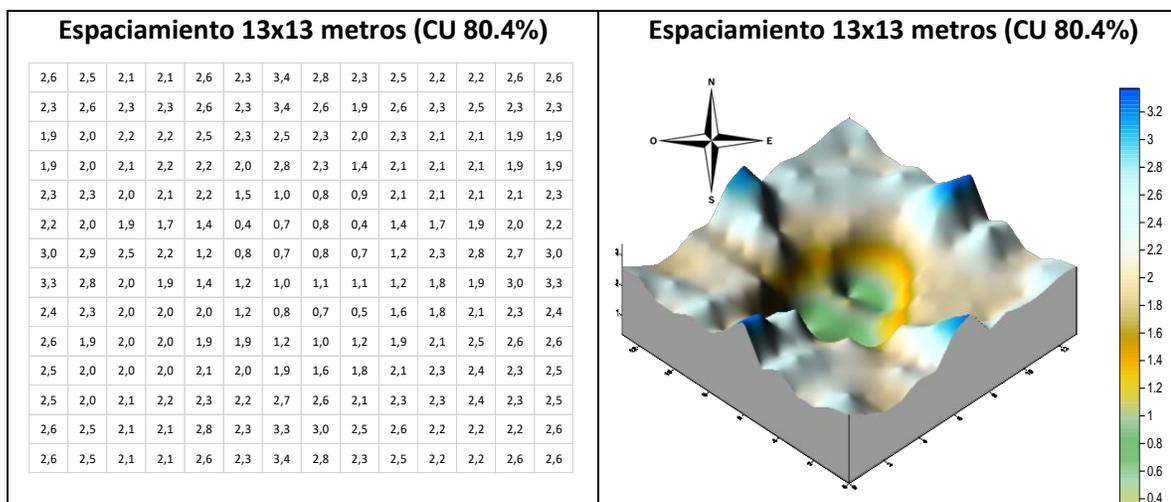
2,6	2,5	2,5	2,5	3,7	3,9	3,9	2,9	2,5	2,5	2,6	2,6
2,3	2,6	2,6	2,6	3,7	3,7	3,7	3,1	2,5	2,8	2,3	2,3
2,3	2,2	2,5	2,6	2,6	3,7	3,8	2,7	2,3	2,3	2,1	2,3
2,4	2,2	2,3	2,6	3,1	3,2	3,1	2,8	2,4	2,3	2,1	2,4
3,2	3,2	2,7	2,8	2,6	2,1	1,8	2,8	2,9	3,1	2,8	3,2
3,9	3,6	3,1	3,0	2,8	2,2	2,2	2,8	2,8	3,0	3,8	3,9
4,0	4,0	3,6	3,5	3,0	2,8	2,2	2,8	3,3	3,7	3,8	4,0
3,6	2,8	2,8	2,5	2,6	3,4	2,8	2,5	2,6	3,0	3,4	3,6
2,7	2,2	2,2	2,3	3,0	3,0	2,8	2,8	2,7	2,6	2,6	2,7
2,7	2,2	2,1	2,3	3,4	3,6	3,5	3,4	2,5	2,6	2,6	2,7
2,6	2,5	2,5	2,5	3,8	3,8	4,0	3,4	2,5	2,5	2,2	2,6
2,6	2,5	2,5	2,5	3,7	3,9	3,9	2,9	2,5	2,5	2,6	2,6



**Espaciamiento 12x12 metros (CU 83.4%)**

2,6	2,5	2,1	2,5	2,6	3,4	3,9	2,8	2,5	2,5	2,2	2,6	2,6
2,3	2,6	2,3	2,6	2,6	3,4	3,7	2,6	2,4	2,6	2,5	2,3	2,3
1,9	2,0	2,2	2,6	2,5	2,5	3,7	2,4	2,3	2,3	2,1	1,9	1,9
2,3	2,2	2,1	2,2	2,5	2,6	3,4	2,0	2,3	2,1	2,1	2,1	2,3
2,3	2,3	2,2	2,2	2,4	1,5	1,3	1,1	2,3	2,2	2,3	2,1	2,3
3,0	2,9	2,5	2,1	1,7	0,7	1,2	0,8	1,8	2,2	2,8	2,7	3,0
3,9	3,6	3,1	3,1	1,9	1,9	1,9	1,7	1,8	2,9	3,0	3,8	3,9
3,4	3,2	2,5	2,4	2,2	1,6	1,8	1,1	1,8	2,1	2,6	3,0	3,4
2,6	1,9	2,2	2,2	2,1	2,2	1,7	1,5	2,1	2,3	2,5	2,6	2,6
2,7	2,2	2,0	2,0	2,2	2,6	2,3	2,1	2,3	2,3	2,6	2,6	2,7
2,5	2,0	2,1	2,2	2,4	3,2	3,1	3,0	2,5	2,3	2,4	2,3	2,5
2,6	2,5	2,1	2,5	2,8	3,3	3,8	3,2	2,6	2,5	2,2	2,2	2,6
2,6	2,5	2,1	2,5	2,6	3,4	3,9	2,8	2,5	2,5	2,2	2,6	2,6





**Figura 48. Diagrama del volumen aplicado de la simulación de 5 espaciamientos para el aspersor Xcel Wobbler**

Los resultados de la simulación muestran que se logran factores de uniformidad de más del 80% para escenarios con espaciamientos entre aspersores de 9x9 a 13x13 metros.

Esto indica que el agua se distribuye uniformemente en el área regada.

También es importante considerar estos aspectos al diseñar, gestionar y monitorear los sistemas de riego para que los agricultores del altiplano puedan aprovechar plenamente los beneficios de una distribución uniforme del agua.

#### 4.5.2. Simulación de riego para el aspersor 423 AG

El cuadro 24, muestra los resultados de la simulación del riego por aspersión (Anexo 11) para 5 espaciamientos diferentes:

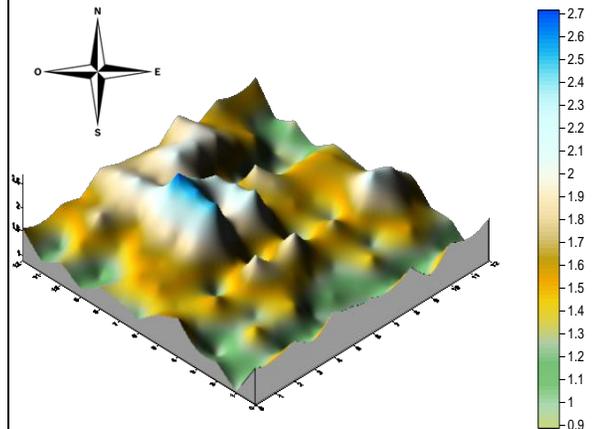
**Cuadro 23. Parámetro (Coeficiente de Uniformidad) del riego por aspersión para el aspersor 423 AG**

Marco cuadrado (%)	Espaciamiento	Coeficiente de uniformidad (%)
50	12 x 12	81,7
55	13 x 13	79,8
60	14 x 14	75,9
65	16 x 16	68,2
70	17 x 17	65,6

**Espaciamiento 12x12 metros (CU 81.7%)**

1,7	0,9	1,3	1,3	1,7	1,5	1,2	1,3	1,3	1,1	1,3	1,1	1,6
1,6	1,1	1,2	0,9	1,3	1,4	1,6	1,6	1,3	1,0	1,5	1,1	1,4
1,7	1,2	1,5	1,2	1,7	1,4	1,6	1,6	1,6	1,4	1,9	1,6	1,6
1,5	0,9	1,3	1,2	1,5	1,1	1,8	1,8	1,8	1,6	1,8	1,6	1,5
1,8	1,1	1,5	1,6	2,0	1,6	2,6	2,6	2,7	2,2	2,1	2,0	1,8
1,7	1,0	1,0	1,6	1,7	1,1	1,8	1,7	2,4	1,8	1,8	1,8	1,7
1,6	1,0	1,2	1,3	2,0	1,6	2,4	2,3	2,2	1,8	2,1	1,9	1,6
1,6	1,0	1,1	1,2	1,6	1,1	1,6	1,6	1,6	1,2	2,0	1,9	1,6
1,8	1,1	1,5	1,4	1,8	1,4	1,6	1,7	1,9	1,2	2,0	2,0	1,9
1,3	0,9	1,3	1,2	1,6	1,2	1,4	1,6	1,4	0,9	1,6	1,6	1,5
1,8	1,2	1,6	1,7	2,3	1,8	1,6	1,6	1,4	0,9	1,5	1,5	1,8
1,6	1,1	1,3	1,6	2,1	1,8	1,6	1,6	1,4	0,9	0,9	1,2	1,6
1,8	0,9	1,3	1,3	1,7	1,5	1,2	1,3	1,3	1,1	1,3	1,1	1,7

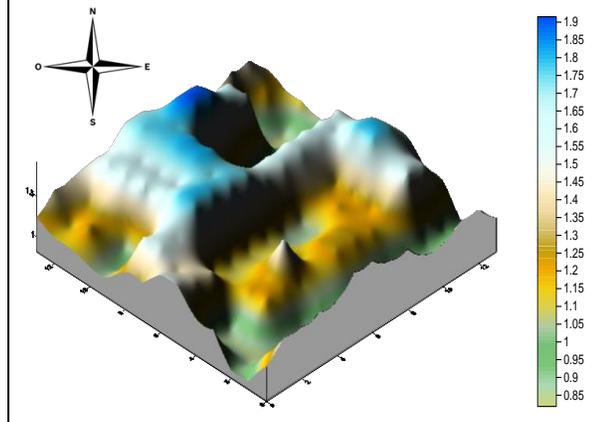
**Espaciamiento 12x12 metros (CU 81.7%)**



**Espaciamiento 13x13 metros (CU 79.8%)**

1,2	0,9	0,9	1,3	1,3	1,5	1,5	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1	1,2
1,4	1,1	0,8	0,9	0,9	1,4	1,4	1,6	1,6	1,0	1,0	1,3	1,4
1,4	0,8	0,8	0,9	0,9	1,4	1,4	1,6	1,6	1,0	1,0	1,3	1,4
1,5	0,9	0,9	1,2	1,2	1,1	1,1	1,8	1,8	1,6	1,6	1,6	1,5
1,5	0,9	0,9	1,2	1,2	1,1	1,1	1,8	1,8	1,6	1,6	1,6	1,5
1,7	1,0	1,0	1,1	1,6	1,1	1,1	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,7
1,7	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,7
1,6	1,0	1,0	1,2	1,2	1,1	1,1	1,6	1,6	1,2	1,2	1,9	1,6
1,6	1,0	1,0	1,2	1,2	1,1	1,1	1,6	1,6	1,2	1,2	1,9	1,6
1,3	0,9	0,9	1,2	1,2	1,2	1,2	1,6	1,6	0,9	0,9	1,6	1,3
1,3	0,9	0,9	1,2	1,2	1,2	1,2	1,6	1,6	0,9	0,9	1,6	1,3
1,5	1,0	1,0	1,6	1,6	1,8	1,8	1,6	1,6	0,9	0,9	0,8	1,5
1,5	1,1	1,0	1,6	1,6	1,8	1,8	1,6	1,6	0,9	0,9	0,8	1,5
1,2	0,9	0,9	1,3	1,3	1,5	1,5	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1	1,2

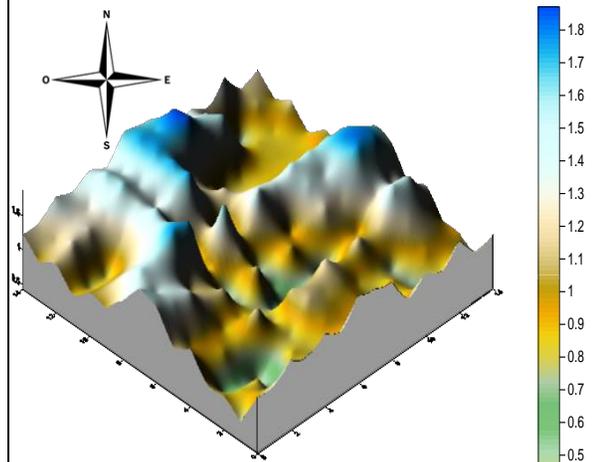
**Espaciamiento 13x13 metros (CU 79.8%)**

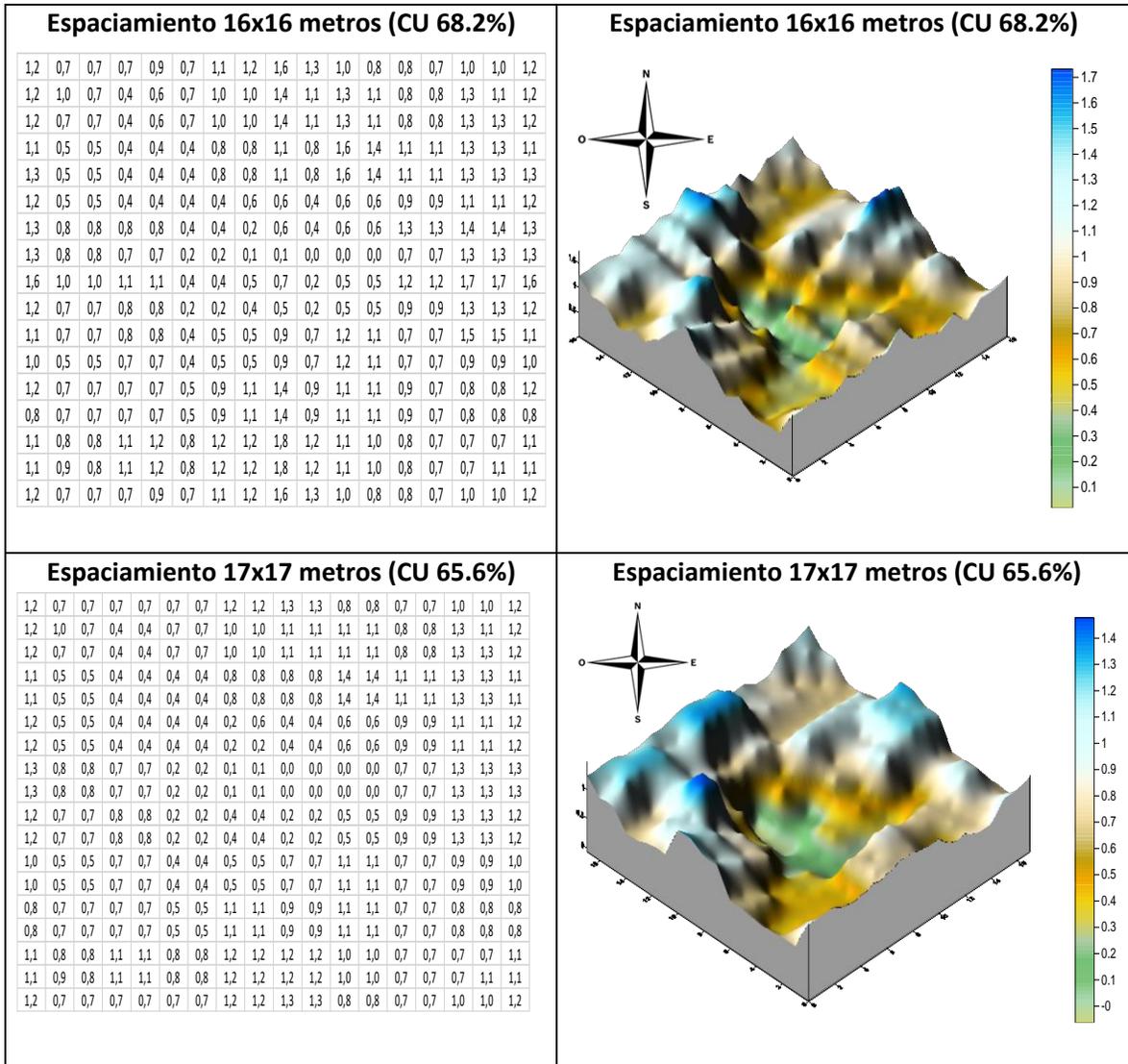


**Espaciamiento 14x14 metros (CU 75.9%)**

1,2	0,7	0,9	0,9	1,3	1,1	1,5	1,6	1,3	1,0	1,1	0,8	1,1	1,0	1,2
1,2	1,0	0,8	0,6	0,9	1,0	1,4	1,4	1,6	1,3	1,0	0,8	1,3	1,1	1,2
1,4	0,7	0,8	0,6	0,9	1,0	1,4	1,4	1,6	1,3	1,0	0,8	1,3	1,3	1,4
1,3	0,5	0,5	0,4	0,8	0,8	1,1	1,1	1,8	1,6	1,3	1,1	1,3	1,3	1,3
1,5	0,9	0,9	0,8	1,2	0,8	1,1	1,1	1,8	1,6	1,6	1,5	1,6	1,6	1,5
1,3	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,8	0,6	1,3	1,3	1,4	1,4	1,3
1,7	1,0	1,0	1,1	1,1	0,6	1,1	1,1	1,7	1,2	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7
1,6	1,0	1,0	1,1	1,1	0,4	0,6	0,7	1,0	0,5	1,2	1,2	1,7	1,7	1,6
1,6	1,0	1,0	1,1	1,2	0,7	1,1	1,0	1,6	1,2	1,2	1,1	1,9	1,9	1,6
1,1	0,7	0,7	0,8	1,0	0,5	0,9	0,9	1,4	1,2	0,9	0,7	1,5	1,5	1,1
1,3	0,9	0,9	0,8	1,2	0,9	1,2	1,4	1,6	1,1	0,9	0,9	1,6	1,4	1,3
1,2	0,7	0,7	0,7	1,1	0,9	1,2	1,4	1,6	1,1	0,9	0,9	1,0	0,8	1,2
1,5	0,8	1,0	1,2	1,6	1,2	1,8	1,8	1,6	1,1	0,9	0,8	0,8	0,7	1,5
1,1	0,9	1,0	1,2	1,6	1,2	1,8	1,8	1,6	1,1	0,9	0,8	0,8	1,1	1,1
1,2	0,7	0,9	0,9	1,3	1,1	1,5	1,6	1,3	1,0	1,1	0,8	1,1	1,0	1,2

**Espaciamiento 14x14 metros (CU 75.9%)**





**Figura 49. Diagrama del volumen aplicado de la simulación de 5 espaciamientos para el aspersor 423 AG**

Cuando el coeficiente de uniformidad (CU) en las simulaciones de riego es menor al 80%, indica que la distribución de agua en el área regada no es uniforme, lo cual tiene implicaciones importantes como la baja eficiencia de riego, problemas de germinación y crecimiento del cultivo, riesgo de erosión y escorrentía.

## 5. CONCLUSIONES

La investigación realizada y de acuerdo a los objetivos y resultados obtenidos se concluye:

- En la región del Altiplano en la Provincia Los Andes del municipio de Laja, de la Estación Experimental de Kallutaca existe variaciones climáticas en un periodo de tres meses, donde se aprecia un comportamiento casi homogéneo de temperatura máxima, siendo la temperatura más alta en el mes de octubre con una máxima de 13,2°C y mínima de 10,80°C, en el mes de agosto, con una ETo de 4,74 mm/día en mes de octubre siendo las más alta juntamente con la velocidad del viento de 1,05 m/s.
- Mediante la evaluación del índice de grosor (IG) generado por el aspersor Xcel Wobbler cuyo diámetro de boquilla 4,76 mm, no alcanzó a llegar al rango de  $7 < IG < 17$  debido a la presión baja teniendo, como presión máxima de 1,4 bares cuyo valor de IG es de 4.29 mientras que el más bajo fue de 0,7 bar con un IG de 1,74 cuyos valores de presiones alcanzaron la presión mínima y media que requiere el aspersor 0,69 bares y como máximo 1,72 bares según su ficha técnica (Anexo2).
- Mediante la evaluación del índice de grosor (IG) generado por el aspersor 423 AG cuyo diámetro de boquilla 4 mm, no alcanzó a llegar al rango de  $7 < IG < 17$  debido a la presión baja y también al tamaño del diámetro de la boquilla del aspersor. Como presión máxima de 1,4 bares cuyo valor de IG es de 5,10 mientras que el más bajo fue de 0.7 bar con un IG de 2,07 cuyos valores de presiones no alcanzaron la presión mínima que requiere el aspersor 2 bares y como máximo 4 bares según su ficha técnica (Anexo1).
- Mediante el método volumétrico se determinó que el aspersor Xcel Wobbler con una boquilla de 4,76 mm, desfoga un caudal de 0,22 l/s, (792 l/h) a una presión de trabajo de 0,7 bares, llegando a incrementarse dicho caudal conforme va aumentando la presión de servicio.
- Mediante el método volumétrico se determinó que el aspersor 423 con una boquilla de 4,00 mm, desfoga un caudal de 0,14 l/s, (504 l/h) a una presión mínima de trabajo de 0,7 bares, llegando a incrementarse dicho caudal conforme va aumentando la presión de servicio.
- El aspersor Xcel Wobbler, y a una presión mínima de 0,7 bar, con la incidencia del viento llega a generar un radio mojado de 8,32 m, mientras que el aspersor 423 AG

y a la misma presión de trabajo, llega a generar un radio mojado de 8,57 m, llegando a poseer un mayor alcance y área mojado en comparación a su ficha técnica.

- En los indicadores de calidad de la evaluación de los dos tipos de aspersores Xcel Wobbler y 423 AG, en condiciones de riego presentó un Coeficiente de Uniformidad CU para el primer aspersor de 84,92 %, y una Eficiencia de Aplicación de 78,62 %, para un marco de riego de 9 x 9, en comparación al aspersor 423 AG que presentó un Coeficiente de Uniformidad CU de 81,9 % con una Eficiencia de Aplicación de 74,7 %. Todos los valores determinados superiores al del aspersor 423 AG. La evaluación realizada de Coeficiente de Uniformidad, indica esta diferencia debido a las características hidráulicas de los tipos de aspersores, con la presión del agua constante para ambos aspersores mostraron resultados distintos, pero valores permisibles para la uniformidad de riego.
- En el caso de la evaluación del aspersor Xcel Wobbler con un Coeficiente de Uniformidad de 84,92 % implica que el 84,92 % de la superficie regada recibió una aplicación de agua uniforme y una desuniformidad en la aplicación del agua de un 15,08 % con relación a la media aplicada. También aplica para la evaluación del aspersor 423 AG.
- Los resultados obtenidos muestran que existen muchos factores que afectan a la uniformidad del riego como ser: las condiciones climáticas (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) y falencias en el diseño tienen una influencia directa a la uniformidad de riego, así como la utilización del filtro para agua de riego.
- La simulación de riego es una herramienta valiosa en el campo de la agricultura y el manejo del agua. Permite a los agricultores planificar y gestionar el recurso hídrico antes de implementarlos en el campo.
- Mediante la evaluación de pluviometría de un aspersor al aire libre y el programa SURFER, se pudo realizar varias simulaciones de traslape que nos permitirá elegir el marco de riego más adecuado para su implementación, conforme a un buen Coeficiente de Uniformidad.

## 6. RECOMENDACIONES

En base a los objetivos, resultados y conclusiones del presente trabajo, se pueden formular las siguientes recomendaciones:

- Evaluar el método de riego por aspersión en diferentes meses, para determinar las limitaciones que pudiesen presentarse (perdidas por evaporación y arrastre de viento, factores climáticos).
- Debido a los factores climáticos del altiplano, es decir, principalmente la influencia negativa del viento y las altas temperaturas durante el día que llegan a producir grandes pérdidas de agua por evaporación y arrastre, es importante realizar riego nocturno, ya que minimiza las pérdidas por evaporación y evita la acción de arrastre de las partículas diminutas de gotas del aspersor.
- Para una mejor evaluación del comportamiento a condiciones altiplánicas se sugiere realizar estudios de diferentes marcos de riego y tipos de aspersores en relación al desempeño hidráulico por la variabilidad climática que presenta la región del altiplano de la Estación Experimental de Kallutaca.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ABC. 2004. La temperatura de riego. Paraguay. Asuncion. Disponible en <https://www.abc.com.py/articulos/la-temperatura-de-riego-788348.html>
- Adena, (Life Medio Ambiente). 2005. Curso de Riego para Agricultores (Proyecto de autogestión del agua en la agricultura). 29 p. Disponible en <https://independent.academia.edu/DvdCaballeroMu%C3%B1oz>
- Agroforestal. 2022. Aspersor Sectorial laton VYR - 50. Jaen. Disponible en <https://agroforestaljaen.com/producto/aspersor-sectorial-laton-vyr-50/>
- Alonso, D. 2010b. el riego por aspersion Escuela Universitaria de Ingenieria 5p.
- Barboza, J. y Mijahuanca, J. 2023. Evaluación del Coeficiente de Uniformidad y Eficiencia de Aplicación del sistema de riego por aspersion Veras, sector de Yerba Buena, Cajamarca Tesis Ing. Agrícola. Peru, Lambayeque. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. 198 p.
- Callisaya, J. 2018. Aplicación de tres láminas de agua con riego por aspersion en el cultivo de la alfalfa en la Estación Experimental de Choquenaira - La Paz. Tesis Master of Science. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andres. 153 p.
- Carrazon, J. 2007. Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego. Editorial comunica ed. Tegucigalpa, Honduras, 162 p.
- Chipana, R. 2006. Principios de Riego y Drenaje. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andres. 202 p.
- Cisneros, E.;Venero, Y.;Placeres, Z. y Gonzales, F. 2019. El viento y su influencia en los parámetros de calidad del riego. Cuba, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola. Disponible en <https://www.redalyc.org/journal/5862/586262756004/html/#B27>

- Cisneros, R. 2003. Apuntes de la Materia de Riego y Drenaje. San Luis, Potosi, Mexico. Centro de Investigacion y Estudios de Posgrado y Area Geodesica. 164 p.
- Condori, O. 2022. Evaluación del desempeño del riego de dos tipos de aspersores, (*xcel-wobbler* y *yuzuak*), en la comunidad Ch'eje - Sorata. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andres. 123 p. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/27516/T2957.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Constitucion Politica del Estado Plurinacional. 2009. Estado Plurinacional de Bolivia.
- Delgadillo, O.; Jimenez, J. y Rojas, C. 2011. Evaluacion de riego por aspersion en parcela. Cochabamba, Bolivia. Centro AGUA Universidad Mayor de San Simon. 60 p.
- Diaconia. 2011. Operacion y mantenimiento de un sistema de riego por aspersion
- Dudek, T. y Fernandez, T. s.f. Conducting a wáter application uniformity evaluation for an overread sprinkler irrigation system in the nursery. Michigan State University. Disponible en [https://www.canr.msu.edu/uploads/235/67987/resources/6-4FactSheetTemplateOverhead\\_Sprinkler.pdf](https://www.canr.msu.edu/uploads/235/67987/resources/6-4FactSheetTemplateOverhead_Sprinkler.pdf)
- Faci, J. y Bercero, A. 1992. Viento y aspersion en los regadios aragoneses. Servicio de Investigacion Agraria. 11. Disponible en [https://citarea.cita-aragon.es/citarea/bitstream/10532/987/1/10532-104\\_6.pdf](https://citarea.cita-aragon.es/citarea/bitstream/10532/987/1/10532-104_6.pdf)
- Faci, J. y Playan, E. 1996. Principios Basicos del Riego por Superficie. España, Zaragoza, 32 p.
- Fernandes, M. y Gonzales, G. 2014. El Sistema de Riego Localizado. España, Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario. Disponible en <http://www.serida.org/pdfs/6003.pdf>

- Fernandez, R.; Oyonarte, N. y García, J. 2010. Manual de Riego para Agricultores. España, Sevilla. 113 p. Disponible en [https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337160240Riego\\_por\\_aspersin.pdf](https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337160240Riego_por_aspersin.pdf)
- Fertilab. 2022. Calidad del agua de riego. Mexico. Disponible en <https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/CALIDAD%20DEL%20AGUA%20DE%20RIEGO.pdf>
- Fisher, R. y Allen, R. 1988. Collector size and test duration effectson sprinkler wáter distribution measurement. Trans ASAE. 542 p.
- Flores, N. 2022. Eficiencia de aplicación del aspersor VYR 60 en el método de riego presurizado en la comunidad de Saraica, distrito de Yanaca, provincia de Aymaraes, región Apurímac – 2020. Tesis Ing. Civil. Peru, Abancay, Apurimac. Universidad Tecnológica de los Andes. 157 p. Disponible en <https://es.scribd.com/document/621272821/Eficiencia-de-Aplicacion-Del-Aspersor-VYR-60-Flores-Torbisco-Nick-222222>
- Geosoluciones. 2009. Soluciones Integrales en Geomática e Ingeniería Geoespacial. Santiago. Chile. Disponible en <https://www.geosoluciones.cl/surfer/>
- Guarachi, E. 2011. Balance hídrico en el cultivo de papa bajo condiciones de drenaje mixto en Suka Kollus Tesis Ing. Agr. El Alto, Bolivia. Universidad Publica de El Alto. 90 p.
- Guarachi, G. 2013. Evaluación técnica de aspersores caseros de baja presión en la Estación Experimental de Kallutaca. Tesis Ing. Agr. El Alto, Bolivia. Universidad Pública de El Alto. 162 p.
- Humeres, D.; Martinez, E. y Tapia, C. 2020. Cómo determinar el coeficiente de uniformidad (CU) de un sistema de riego en cerezos y su impacto en huertos en formación y producción. Disponible en <https://smartcherry.cl/manejos-agronomicos/riego/como-determinar-el-coeficiente-de-uniformidad-cu-de-un-sistema-de-riego-en-cerezos-y-su-impacto-en-huertos-en-formacion-y-produccion/>

- INIA, (CENTRO REGIONAL DE INVESTIGACIÓN CARILLANCA). 1994. Selección y Manejo de Equipos de Riego por Aspersión. Osorno, Chile, 31 p. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/31815/NR17720.pdf?sequence=1>
- INIA, (CENTRO REGIONAL DE INVESTIGACIÓN CARILLANCA). 2001. Comisión Nacional de Riego "Riego por aspersión". Chile, 48 p.
- INTA, (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). 2009. Riego en Horticultura, guía para la intalacion de pequeños sistemas de riego. Centro regional misiones, proyecto capacitacion a distancia.
- Jimenez, J. y Delgadillo, O. 2006. Guía para la evaluación de sistemas de riego por aspersión estacionarios. Cochabamba, Bolivia. Universidad Mayor de San Simón. 31 p.
- Martinez, F. 2014. Introducción al Riego. Universidad Politécnica de Valencia ed. España. 17 p. Disponible en [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/67110/TOC\\_6152\\_01\\_01.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/67110/TOC_6152_01_01.pdf)
- MINAGRI, (Ministerio de Agricultura y Riego). 2014. Operación y mantenimiento del sistema de riego por aspersión en laderas. Lima, Perú, Biblioteca Nacional del Perú. 26 p. Disponible en [http://www.psi.gob.pe/docs/%5Cbiblioteca%5Cmanuales%5C2015%5Coperacion\\_laderas.pdf](http://www.psi.gob.pe/docs/%5Cbiblioteca%5Cmanuales%5C2015%5Coperacion_laderas.pdf)
- MINAGRI, (Ministerio de Agricultura y Riego). 2015. Manual del cálculo de eficiencia para sistemas de riego. Lima, Perú, 54 p. Disponible en [https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/manual-riego/manual\\_determinacion\\_eficiencia\\_riego.pdf](https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/manual-riego/manual_determinacion_eficiencia_riego.pdf)

- Ministerio de Agricultura, P. y. A. Riego por aspersion Madrid, España. Disponible en <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/observatorio-de-tecnologias-probadas/material-de-riego/aspersion.aspx>
- Monge, M. 2017. Interpretación de un análisis de agua para riego Disponible en <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/interpretacion-analisis-agua-riego>.
- Montero, J. 2000. Análisis de la distribución del agua en sistemas de riego por aspersion. La Mancha, España. Universidad de Castilla
- Moya, J. 2009. Riego localizado y fertirrigacion edMundi. Place Published, 23,64.
- NDI, N. D. J. 2015. Catalogo de aspersores AgroNayade. La Paz, Bolivia. Jain Irrigation System. 36 p.
- Ochoa, R. 2008. Bioestadística, Analisis de varianza. 1ra edición. La Paz, Bolivia.
- Paredes, D. y Arragan, F. 2018. Efecto del solapamiento en riego por aspersion para producción de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el Municipio de Patacamaya, altiplano central. Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales. 5 16 - 26. Disponible en <https://riiarn.umsa.bo/index.php/RIIARn/article/view/98/83>
- Peralta, J. y Simpfendörfer, C. 2001. Riego por aspersion. Chile.
- Pereira, L. 2004. El riego y sus tecnologias. Europa-América en Lisboa ed. Albacete, España, 296 p.
- Pereira, L.;Valero, J.;Picornell, M. y Tarjuelo, J. 2010. El riego y sus tecnologias Universidad la Castilla, La Mancha, 296 p. (Centro Regional de Estudios del Agua).

- Pizarro, F. 1996. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación. 3 ed. España, Disponible en <https://es.scribd.com/document/494675214/312379749-Pizarro-Riego-Localizados-de-Alta-Frecuencia-1-Copia>
- Poma, I. 2014. Estudio del comportamiento hidráulico relacionado a la uniformidad de aplicación mediante el método de riego por aspersión en la Estación Experimental de Choquenaira. Tesis Ing. Agr. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. 92 p. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/5634/T2045.pdf?sequen&isAllowed=y>
- Revilla, F. 2010. Riego por aspersión. Colección de Prácticas en el Sector Agropecuario, Junta de Castilla y León. 67 p. (España).
- Quiape, C.; Quispe, E. y Mamani, E. 2020. Evaluación agronómica de una variedad de pimentón (*Capsicum annum* L.) en tres densidades de siembra en ambientes atemperados en la Localidad de Kallutaca. El Alto, Bolivia, 58 p. Disponible en [chromeextension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://dicyt.upea.bo/assets/eventos\\_cien/evento\\_1634310242.pdf](chromeextension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://dicyt.upea.bo/assets/eventos_cien/evento_1634310242.pdf)
- Salvatierra, B. 2019. Evaluación de la distribución del agua en sistemas de riego por aspersión estacionarios con viento. España, Sevilla. Universidad de Sevilla. 149 p.
- Senninger. 2012. Xcel Wobbler. Disponible en <https://www.senninger.com/es/product/xcel-wobblertm>
- Serrano, G. 2012. Caracterización y construcción de aspersores rotatorios de reacción. La Paz, Bolivia. 8 p.
- Serrano, G. 2014. Ingeniería del Riego Tecnificado. Primera ed. La Paz, Bolivia,

Servicio de Asesoramiento Regante. 2010. Procedimiento para la realización de evaluaciones en riego por aspersión, 11 p. Disponible en <https://core.ac.uk/download/pdf/48515406.pdf>

SIAR, (Servicio integrado de agroclimatología y riego). 1999. Programación del Riego. Universidad de Talca, Chile, 20 p.

Tarjuelo, J. 1999. El riego por aspersión y su tecnología. 2da ed. España, Ediciones Mundi Prensa. 567 p.

Tarjuelo, J. 2005. El riego por aspersión y su tecnología. Madrid, España, 581 p.

Universidad de Sevilla. 2008. Hidraulica y Riegos. España. Disponible en [http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-yriegos/temario/Tema%209.%20Riego%20por%20aspersion/page\\_02.htm](http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-yriegos/temario/Tema%209.%20Riego%20por%20aspersion/page_02.htm)

## **8. ANEXOS**

## Anexo 1. Especificaciones técnicas Aspensor 423 AG

# 423 AG



**Especialmente diseñado para riego de bordes de campo**

**Aplicaciones:** para todo tipo de riego sobre el follaje

- Elevada distribución del agua con espaciamento de hasta 14 m
- Construido totalmente en bronce para mayor duración y resistencia
- Manguito de protección contra arena y polvo, asegura una operación confiable y durable

## Aspersores de Cobertura Total

Aspensor metálico a impacto de círculo completo o parcial

Rosca macho de 1/2" o hembra de 3/4"

**423 AG Tabla de Rendimiento**

Color de boquilla (mm)	P (bar)	Q (m <sup>3</sup> /h)	D (m)
3.2 Verde	2.0	0.570	23
	3.0	0.700	25
	4.0	0.810	26
3.5 Azul	2.0	0.660	24
	3.0	0.810	26
	4.0	0.930	27
4.0* Negro	2.0	0.850	25
	3.0	1.030	27
	4.0	1.180	28

\* Boquilla e standard

\* Tabla de rendimiento preparada bajo condiciones de laboratorio

\* En condiciones de viento, utilice un espaciamento más estrecho

## Anexo 2. Especificaciones técnicas del Aspersor Xcel Wobbler

### Xcel-Wobbler® (Wobblers)



Angulo Alto

El Xcel-Wobbler de Senninger aumenta al máximo la superficie de cobertura. Su exclusiva acción rotativa oscilante produce una cobertura sumamente uniforme, a bajas presiones y con una pérdida muy baja por evaporación.

#### CARACTERÍSTICAS:

- El diseño de contrabalanceo produce un desempeño suave y estable
- Una sola parte móvil, para mayor vida útil
- Tamaños de entradas M de 3/4" ó 1/2" NPT
- Caudales: 0.78 a 6.97 gpm (177 a 1583 L/hr)
- Baja deriva por viento y baja pérdida por evaporación a bajas presiones
- Garantía de dos años en materiales, mano de obra y desempeño
- Boquillas codificadas por color para fácil identificación de tamaño y con garantía de mantener el diámetro correcto de orificio por cinco años.



Angulo Medio



El Xcel-Wobbler proporciona una máxima superficie de cobertura en aspersiones subfoliares y aspersiones foliares en viveros.



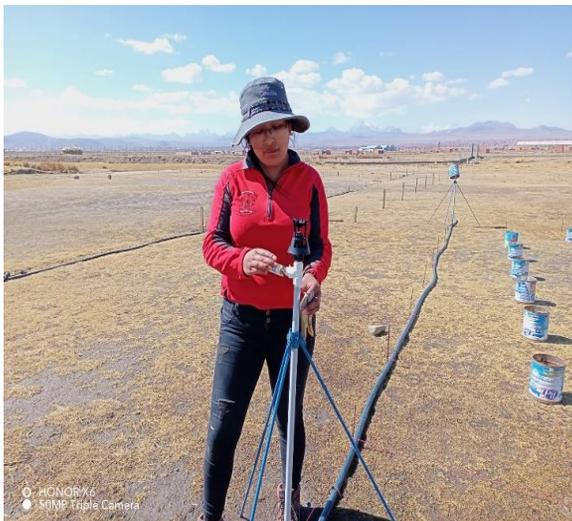
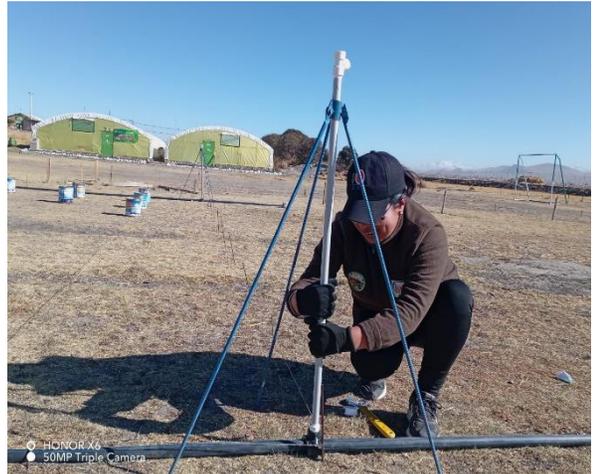
# Wobblers) Xcel-Wobbler®



Presión en la base del aspersor (psi)					Presión en la base del aspersor (bar)				
	10	15	20	25		0.69	1.03	1.38	1.72
<b>Boquilla #6 - Dorada (3/32")</b>					<b>Boquilla #6 - Dorada (2.38mm)</b>				
Caudal(gpm)	0.78	0.95	1.10	1.23	Caudal(L/hr)	177	216	250	279
HA Diám. a 1.5' alt (pies)	36.5	41.0	45.0	46.0	HA Diám. a 0.46m alt (m)	11.1	12.5	13.7	14.0
MA Diám. a 1.5' alt (pies)	32.0	35.0	38.5	41.0	MA Diám. a 0.46m alt (m)	9.8	10.7	11.7	12.5
<b>Boquilla #7 - Lima (7/64")</b>					<b>Boquilla #7 - Lima (2.78mm)</b>				
Caudal(gpm)	1.06	1.30	1.50	1.68	Caudal(L/hr)	241	295	341	382
HA Diám. a 1.5' alt (pies)	40.0	46.5	47.0	50.5	HA Diám. a 0.46m alt (m)	12.2	14.2	14.3	15.4
MA Diám. a 1.5' alt (pies)	33.0	36.5	40.5	41.0	MA Diám. a 0.46m alt (m)	10.1	11.1	12.4	12.5
<b>Boquilla #8 - Lavanda (1/8")</b>					<b>Boquilla #8 - Lavanda (3.18mm)</b>				
Caudal(gpm)	1.40	1.71	1.98	2.21	Caudal(L/hr)	318	388	450	502
HA Diám. a 1.5' alt (pies)	42.0	46.5	47.0	51.5	HA Diám. a 0.46m alt (m)	12.8	14.2	14.3	15.7
MA Diám. a 1.5' alt (pies)	34.0	38.5	41.0	42.5	MA Diám. a 0.46m alt (m)	10.4	11.7	12.5	13.0
<b>Boquilla #9 - Gris (9/64")</b>					<b>Boquilla #9 - Gris (3.57mm)</b>				
Caudal(gpm)	1.80	2.20	2.54	2.84	Caudal(L/hr)	409	500	577	645
HA Diám. a 1.5' alt (pies)	44.0	47.0	50.5	52.5	HA Diám. a 0.46m alt (m)	13.4	14.3	15.4	16.0
MA Diám. a 1.5' alt (pies)	34.5	40.5	42.0	43.0	MA Diám. a 0.46m alt (m)	10.5	12.4	12.8	13.1
<b>Boquilla #10 - Turquesa (5/32")</b>					<b>Boquilla #10 - Turquesa (3.97mm)</b>				
Caudal(gpm)	2.22	2.72	3.14	3.51	Caudal(L/hr)	504	618	713	797
HA Diám. a 1.5' alt (pies)	44.5	49.0	50.5	53.5	HA Diám. a 0.46m alt (m)	13.6	14.9	15.4	16.3
MA Diám. a 1.5' alt (pies)	36.0	41.0	42.5	44.0	MA Diám. a 0.46m alt (m)	11.0	12.5	13.0	13.4
<b>Boquilla #11 - Amarilla (11/64")</b>					<b>Boquilla #11 - Amarilla (4.37mm)</b>				
Caudal(gpm)	2.69	3.30	3.81	4.26	Caudal(L/hr)	611	749	865	968
HA Diám. a 1.5' alt (pies)	44.5	50.5	51.5	54.0	HA Diám. a 0.46m alt (m)	13.6	15.4	15.7	16.5
MA Diám. a 1.5' alt (pies)	36.0	41.5	43.0	44.0	MA Diám. a 0.46m alt (m)	11.0	12.7	13.1	13.4
<b>Boquilla #12 - Roja (3/16")</b>					<b>Boquilla #12 - Roja (4.76mm)</b>				
Caudal(gpm)	3.23	3.96	4.57	5.11	Caudal(L/hr)	734	899	1038	1161
HA Diám. a 1.5' alt (pies)	46.0	50.5	52.0	54.5	HA Diám. a 0.46m alt (m)	14.0	15.4	15.9	16.6
MA Diám. a 1.5' alt (pies)	36.5	41.5	44.5	44.5	MA Diám. a 0.46m alt (m)	11.1	12.7	13.6	13.6
<b>Boquilla #13 - Blanca (13/64")</b>					<b>Boquilla #13 - Blanca (5.16mm)</b>				
Caudal(gpm)	3.80	4.65	5.38	6.01	Caudal(L/hr)	863	1056	1222	1365
HA Diám. a 1.5' alt (pies)	46.5	51.0	52.5	55.5	HA Diám. a 0.46m alt (m)	14.2	15.6	16.0	16.9
MA Diám. a 1.5' alt (pies)	36.5	41.5	44.5	45.0	MA Diám. a 0.46m alt (m)	11.1	12.7	13.6	13.7
<b>#14 Nozzle - Blue (7/32")</b>					<b>Boquilla #14 - Azul (5.56mm)</b>				
Caudal(gpm)	4.40	5.39	6.23	6.97	Caudal(L/hr)	999	1224	1415	1583
HA Diám. a 1.5' alt (pies)	47.0	51.0	53.0	55.5	HA Diám. a 0.46m alt (m)	14.3	15.6	16.2	16.9
MA Diám. a 1.5' alt (pies)	37.0	42.5	45.0	46.5	MA Diám. a 0.46m alt (m)	11.3	13.0	13.7	14.2

El desempeño de los aspersores puede variar en condiciones reales de campo. Hay disponibles otros tamaños de boquillas; consultar a fábrica para datos específicos de desempeño. Las alturas de los chorros varían entre 2.5 y 5.5 pies (0.8 a 1.7 m) por encima de la boquilla, dependiendo de la presión y del tamaño de la boquilla. La altura mínima recomendada para los elevadores es de 1.5 pies (0.46 m).

**Anexo 3. Armado de la red de tuberías, pluviómetros.**



**Anexo 4. Lecturas de presión de la bomba hidráulica, tuberías secundarias y dispositivos de riego.**



**Anexo 5. Evaluación de los pluviómetros**



**Anexo 6. Análisis de la calidad de agua con el multiparámetro**



## Anexo 7. Informe climatológico de los meses de agosto, septiembre y octubre de 2023 de la Estación Experimental Kallutaca en la Universidad Pública de El Alto

### MONTHLY CLIMATOLOGICAL SUMMARY for AUG. 2023

NAME: KALUTACA OCT 2023 CITY: STATE:  
ELEV: 0 m LAT: LONG:

TEMPERATURE (°C), RAIN (mm), WIND SPEED (m/s)

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	4.8	14.7	17:00	-5.7	7:00	13.5	0.0	0.0	0.8	9.4	17:00	SW
2	4.4	16.1	16:00	-7.2	7:00	13.9	0.0	0.0	0.4	4.9	17:00	SW
3	5.2	17.3	16:00	-6.8	7:00	13.1	0.0	0.0	0.6	8.0	16:00	S
4	5.8	15.8	15:00	-5.2	7:00	12.6	0.0	0.0	0.8	6.7	16:00	SW
5	5.6	16.3	14:00	-4.2	6:00	12.8	0.0	0.0	1.0	8.9	17:00	S
6	6.4	16.6	15:00	-3.6	4:00	11.9	0.0	0.0	0.8	11.2	16:00	ENE
7	6.8	16.9	14:00	-3.6	7:00	11.6	0.0	0.0	0.8	8.5	15:00	WNW
8	6.7	17.1	15:00	-2.7	8:00	11.6	0.0	0.0	0.4	6.7	16:00	NE
9	6.8	17.2	15:00	-3.4	6:00	11.6	0.0	0.0	0.5	9.4	15:00	ENE
10	7.0	16.8	15:00	-3.8	5:00	11.3	0.0	0.0	0.2	4.5	13:00	NW
11	5.7	16.9	14:00	-5.2	7:00	12.6	0.0	0.0	0.4	7.6	16:00	SE
12	5.2	13.7	15:00	-1.7	5:00	13.2	0.0	0.0	1.0	8.0	15:00	SSW
13	5.0	12.0	17:00	0.7	6:00	13.3	0.0	2.8	0.6	6.3	17:00	SSW
14	4.9	13.3	15:00	-1.7	8:00	13.4	0.0	0.0	0.8	12.5	17:00	S
15	5.1	15.4	17:00	-3.6	7:00	13.3	0.0	0.3	0.4	6.3	14:00	ENE
16	6.7	17.6	14:00	-4.6	6:00	11.7	0.0	0.0	0.4	6.7	14:00	SSW
17	7.6	18.8	15:00	-3.7	5:00	10.7	0.0	0.0	0.7	18.8	15:00	NE
18	6.6	18.7	15:00	-8.1	7:00	11.8	0.0	0.0	1.4	12.5	16:00	NNW
19	4.4	17.6	16:00	-10.8	7:00	13.9	0.0	0.0	0.7	7.2	14:00	ENE
20	5.8	18.2	15:00	-7.7	5:00	12.5	0.0	0.0	0.5	6.7	14:00	NNW
21	5.0	16.8	17:00	-8.0	7:00	13.3	0.0	0.0	0.8	8.0	13:00	SW
22	5.9	18.2	16:00	-7.1	7:00	12.4	0.0	0.0	0.8	7.2	11:00	SW
23	6.8	19.3	16:00	-5.8	6:00	11.6	0.0	0.0	0.3	5.8	15:00	NW
24	7.4	19.9	15:00	-6.7	7:00	11.0	0.1	0.0	0.4	6.7	17:00	ENE
25	7.1	19.4	16:00	-5.6	7:00	11.2	0.0	0.0	0.4	7.6	17:00	WNW
26	8.2	18.1	15:00	-1.0	7:00	10.2	0.0	0.0	0.7	8.0	15:00	ENE
27	7.9	19.3	16:00	-2.6	7:00	10.4	0.0	0.0	0.3	11.6	14:00	NNW
28	8.7	20.3	16:00	-1.9	4:00	9.8	0.1	0.0	0.4	6.3	11:00	NE
29	8.9	20.8	17:00	-3.2	7:00	9.7	0.3	0.0	0.4	5.4	14:00	SW
30	9.2	19.6	15:00	-1.4	7:00	9.2	0.1	0.0	0.7	8.5	16:00	SW
31	8.7	19.2	14:00	-1.6	7:00	9.6	0.0	0.0	0.9	9.4	17:00	SW
	6.5	20.8	29	-10.8	19	368.6	0.6	3.0	0.6	18.8	17	ENE

Max >= 32.0: 0

Max <= 0.0: 0

Min <= 0.0: 30

Min <= -18.0: 0

Max Rain: 2.79 ON 13/08/23

Days of Rain: 2 (> .2 mm) 1 (> 2 mm) 0 (> 20 mm)

Heat Base: 18.3 Cool Base: 18.3 Method: Integration

## MONTHLY CLIMATOLOGICAL SUMMARY for SEP. 2023

NAME: KALUTACA OCT 2023 CITY: STATE:  
 ELEV: 0 m LAT: LONG:

TEMPERATURE (°C), RAIN (mm), WIND SPEED (m/s)

DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG		TIME	DOM
	TEMP	HIGH				DEG	DEG		WIND	HIGH		
1	9.3	17.8	15:00	0.6	6:00	9.0	0.0	0.5	1.4	9.8	15:00	NE
2	9.6	17.9	15:00	0.6	7:00	8.7	0.0	0.0	1.6	9.8	16:00	NE
3	9.6	17.8	14:00	1.1	00:00	8.7	0.0	0.0	2.3	15.2	11:00	ENE
4	7.9	18.0	18:00	-4.8	7:00	10.4	0.0	0.0	0.4	5.8	16:00	S
5	7.8	17.6	14:00	-2.1	7:00	10.5	0.0	0.0	0.9	13.4	15:00	S
6	6.8	15.7	12:00	0.7	7:00	11.5	0.0	3.3	1.1	8.9	13:00	NE
7	8.3	15.9	15:00	1.3	00:00	10.0	0.0	0.0	2.0	10.7	6:00	ENE
8	6.9	17.1	16:00	-3.8	5:00	11.4	0.0	0.0	0.9	9.4	14:00	W
9	7.3	18.3	17:00	-6.4	7:00	11.0	0.0	0.0	0.4	7.2	17:00	SW
10	7.9	18.0	14:00	-2.3	6:00	10.4	0.0	0.0	1.3	9.4	16:00	SW
11	8.3	19.4	15:00	-4.1	5:00	10.1	0.1	0.0	0.7	8.0	18:00	SSE
12	9.5	18.8	15:00	-1.1	5:00	8.8	0.0	0.0	1.1	9.4	16:00	ENE
13	8.7	18.3	16:00	-0.3	7:00	9.6	0.0	0.0	0.8	8.5	17:00	ENE
14	6.9	17.7	15:00	-5.1	6:00	11.4	0.0	0.0	0.3	5.8	15:00	NE
15	9.1	19.8	16:00	-3.3	7:00	9.4	0.2	0.0	0.6	7.2	14:00	NE
16	8.6	18.8	15:00	-1.3	6:00	9.8	0.0	0.0	1.3	11.2	16:00	S
17	9.0	19.7	17:00	-2.3	6:00	9.4	0.1	0.0	0.5	8.0	18:00	S
18	9.3	20.2	15:00	-2.6	5:00	9.2	0.1	0.0	0.6	6.7	17:00	S
19	9.8	18.0	15:00	4.1	5:00	8.6	0.0	0.0	1.0	8.9	17:00	ENE
20	9.2	18.1	15:00	1.2	7:00	9.2	0.0	0.5	1.0	9.8	17:00	SSW
21	10.3	19.0	15:00	2.8	7:00	8.0	0.0	0.3	0.9	11.6	17:00	S
22	10.9	19.2	14:00	3.3	6:00	7.5	0.1	0.0	1.5	9.8	12:00	S
23	11.0	18.5	15:00	4.2	1:00	7.3	0.0	0.0	1.1	9.4	14:00	E
24	9.9	19.2	15:00	1.8	5:00	8.5	0.0	0.0	1.1	10.7	14:00	S
25	10.3	21.0	16:00	-0.4	7:00	8.3	0.3	0.0	0.8	7.2	15:00	ENE
26	11.4	21.2	15:00	0.3	7:00	7.2	0.3	0.3	0.8	7.6	12:00	W
27	10.4	19.4	13:00	4.3	2:00	7.9	0.0	1.3	1.6	11.2	16:00	SW
28	12.6	20.6	15:00	4.8	5:00	6.1	0.3	0.0	0.8	7.2	14:00	W
29	10.9	18.7	15:00	3.3	7:00	7.4	0.0	0.0	0.9	8.9	15:00	SSW
30	9.6	18.1	15:00	1.4	7:00	8.7	0.0	0.0	0.7	8.0	15:00	ENE
<hr/>												
	9.2	21.2	26	-6.4	9	274.0	1.4	6.1	1.0	15.2	3	S

Max >= 32.0: 0

Max <= 0.0: 0

Min <= 0.0: 14

Min <= -18.0: 0

Max Rain: 3.30 ON 06/09/23

Days of Rain: 6 (> .2 mm) 1 (> 2 mm) 0 (> 20 mm)

Heat Base: 18.3 Cool Base: 18.3 Method: Integration

## MONTHLY CLIMATOLOGICAL SUMMARY for OCT. 2023

NAME: kallutaca dic CITY: STATE:  
 ELEV: 0 m LAT: 16° 31' 00" S LONG: 68° 19' 00" W

TEMPERATURE (°C), RAIN (mm), WIND SPEED (m/s)

DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG		TIME	DOM
	TEMP	HIGH				DEG	DEG		WIND	SPEED		DIR
1	10.6	18.9	14:00	2.7	7:00	7.7	0.0	1.8	1.0	9.8	14:00	NE
2	12.3	21.3	16:00	3.1	6:00	6.4	0.4	0.5	0.7	7.2	1:00	WSW
3	11.7	22.0	16:00	1.1	7:00	7.1	0.4	0.3	0.8	7.2	15:00	WSW
4	12.6	22.3	14:00	2.7	6:00	6.3	0.6	0.0	1.1	9.8	18:00	NNW
5	12.2	21.4	14:00	2.9	7:00	6.7	0.5	0.0	1.3	10.3	15:00	ENE
6	12.6	22.6	15:00	1.9	6:00	6.6	0.8	0.0	0.8	7.6	15:00	NNE
7	12.6	22.1	16:00	2.1	6:00	6.4	0.7	0.0	1.0	9.4	15:00	ENE
8	13.2	22.1	15:00	6.1	6:00	5.8	0.7	0.0	1.3	10.7	14:00	ENE
9	12.1	20.9	14:00	4.6	7:00	6.4	0.2	0.0	0.8	7.6	16:00	SSW
10	12.2	21.2	15:00	3.6	6:00	6.4	0.3	0.0	0.8	8.9	17:00	ESE
11	12.9	22.3	15:00	1.8	6:00	6.2	0.8	0.0	1.2	10.3	15:00	ESE
12	12.2	20.7	15:00	2.9	7:00	6.3	0.2	0.0	1.0	10.3	14:00	WNW
13	12.2	20.4	15:00	4.9	4:00	6.4	0.2	0.0	2.2	11.2	15:00	SW
14	9.5	19.0	15:00	1.2	5:00	8.8	0.0	3.0	0.8	8.0	14:00	NNW
15	9.9	20.4	15:00	-0.3	6:00	8.5	0.1	0.3	1.1	15.6	14:00	E
16	9.4	19.2	15:00	-0.8	6:00	8.9	0.1	0.0	0.9	8.5	15:00	S
17	8.8	16.7	14:00	-0.2	6:00	9.5	0.0	0.0	0.6	9.4	16:00	SSW
18	8.6	16.9	14:00	-0.3	5:00	9.7	0.0	0.5	0.8	7.6	15:00	SSW
19	8.5	13.8	11:00	4.2	7:00	9.8	0.0	0.5	1.2	8.9	17:00	WNW
20	9.1	14.6	16:00	5.3	2:00	9.2	0.0	1.3	0.9	9.4	14:00	WSW
21	8.9	15.5	14:00	2.2	00:00	9.4	0.0	0.8	0.6	8.9	14:00	SE
22	9.8	17.5	13:00	2.3	1:00	8.6	0.0	0.0	1.1	11.2	15:00	SW
23	10.7	17.9	13:00	5.8	2:00	7.6	0.0	0.0	1.3	11.6	14:00	WNW
24	10.2	17.3	12:00	5.1	7:00	8.2	0.0	3.6	1.0	8.0	13:00	SW
25	11.2	19.2	14:00	3.4	7:00	7.2	0.1	0.3	0.7	8.5	12:00	SW
26	12.1	19.7	15:00	4.3	7:00	6.3	0.1	0.0	1.1	9.4	17:00	WNW
27	12.5	21.1	14:00	4.0	4:00	6.2	0.3	0.0	1.1	8.9	15:00	ENE
28	12.1	19.9	15:00	4.8	00:00	6.4	0.2	0.0	2.3	11.6	20:00	ENE
29	10.2	19.3	16:00	-0.9	6:00	8.2	0.1	0.0	1.1	8.9	12:00	WNW
30	11.6	21.1	16:00	0.7	5:00	7.2	0.4	0.0	0.7	8.5	13:00	ENE
31	11.4	21.0	16:00	1.2	7:00	7.2	0.3	0.0	1.3	8.0	17:00	N
	11.1	22.6	6	-0.9	29	231.8	7.3	12.7	1.1	15.6	15	ENE

Max >= 32.0: 0

Max <= 0.0: 0

Min <= 0.0: 5

Min <= -18.0: 0

Max Rain: 3.56 ON 24/10/23

Days of Rain: 11 (> .2 mm) 2 (> 2 mm) 0 (> 20 mm)

Heat Base: 18.3 Cool Base: 18.3 Method: Integration

### Anexo 8. Resultados obtenidos del parámetro de Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CU %) y Eficiencia de aplicación (EA %), bajo incidencia del viento aspensor Xcel Wobbler

Nº	HI	Desvios
1	194	52,234375
2	196	50,234375
3	197	49,234375
4	200	46,234375
5	200	46,234375
6	200	46,234375
7	200	46,234375
8	200	46,234375
9	202	44,234375
10	203	43,234375
11	205	41,234375
12	206	40,234375
13	212	34,234375
14	213	33,234375
15	214	32,234375
16	218	28,234375
17	220	26,234375
18	221	25,234375
19	224	22,234375
20	224	22,234375
21	225	21,234375
22	226	20,234375
23	228	18,234375
24	230	16,234375
25	233	13,234375
26	235	11,234375
27	241	5,234375
28	249	2,765625
29	250	3,765625
30	250	3,765625
31	250	3,765625
32	250	3,765625
33	250	3,765625
34	254	7,765625
35	255	8,765625
36	255	8,765625
37	255	8,765625
38	255	8,765625
39	257	10,765625
40	260	13,765625
41	260	13,765625
42	265	18,765625
43	265	18,765625
44	265	18,765625
45	266	19,765625
46	270	23,765625
47	270	23,765625
48	274	27,765625
49	275	28,765625
50	275	28,765625
51	275	28,765625
52	277	30,765625
53	277	30,765625
54	279	32,765625
55	280	33,765625
56	284	37,765625
57	285	38,765625
58	285	38,765625
59	286	39,765625
60	288	41,765625
61	293	46,765625
62	300	53,765625
63	303	56,765625
64	305	58,765625
Σ=	15759	1762,65625

Sumatoria  
 Media  $\bar{x}$ = 246,234375  
 Desviación estanda  $s$ = 31,90  
 Coef de variación  $CV$ = 0,1296  
 Prom cuarto inf  $qx1/4$ = 197,83  
 Desviacion promedio  $Desx$ = 27,5415039  
 Coef. de uniformidad  $CU$ = 0,888  
 Cv con desv promedio  $CV$ = 0,1119  
 Unif de distrib en ci  $Udci$ = 0,8034

$CU = 88,8 \%$

•Eficiencia de distribución (Eda)

$$EDA = 100 + (606 - 24.9 \cdot f + 0.349 \cdot f^2 - 0.00186 \cdot f^3) \cdot \left[1 - \frac{CU}{100}\right]$$

$EDA = 85,30 \%$

•Fracción de superficie adecuadamente regada

(Marco de riego 9 x 9)

$f = 85 \%$  Introducir dato Cultivos de valor medio o alto = 90 %  
 Cultivos de menor valor o forrajeros = 80 %

•Proporción efectiva de agua que llega al suelo (Pe)

$$Pe = 0.976 + 0.005 \cdot ETP - 0.00017 \cdot ETP^2 + 0.0012 \cdot V - IG - (0.00043 \cdot ETP + 0.00018 \cdot V + 0.000016 \cdot ETP \cdot V)$$

$Pe = 0,980$

ETP =	3,75	mm/día
v =	1,440	km/h
IG =	7	

•Perdidas por fugas en conducción (Pd)

$$0,99 < Pd < 1,0$$

$Pd = 1$

•Eficiencia de aplicación (Ea)

$$Ea = EDA \cdot Pe \cdot Pd$$

$Ea = 83,63 \%$  0,836

CU=	0,888
CU=	88,8 %

Nº	Hí	Desvios
1	149	40,875
2	149	40,875
3	150	39,875
4	155	34,875
5	160	29,875
6	160	29,875
7	160	29,875
8	162	27,875
9	162	27,875
10	163	26,875
11	165	24,875
12	166	23,875
13	166	23,875
14	167	22,875
15	168	21,875
16	169	20,875
17	175	14,875
18	178	11,875
19	178	11,875
20	178	11,875
21	180	9,875
22	181	8,875
23	182	7,875
24	183	6,875
25	184	5,875
26	185	4,875
27	188	1,875
28	189	0,875
29	192	2,125
30	194	4,125
31	195	5,125
32	195	5,125
33	195	5,125
34	195	5,125
35	195	5,125
36	196	6,125
37	196	6,125
38	199	9,125
39	200	10,125
40	201	11,125
41	201	11,125
42	203	13,125
43	205	15,125
44	206	16,125
45	206	16,125
46	207	17,125
47	207	17,125
48	207	17,125
49	208	18,125
50	208	18,125
51	209	19,125
52	210	20,125
53	211	21,125
54	211	21,125
55	212	22,125
56	213	23,125
57	214	24,125
58	214	24,125
59	214	24,125
60	215	25,125
61	215	25,125
62	216	26,125
63	217	27,125
64	218	28,125

Sumatoria	Σ=	12152	1129
Media	qx=	189,875	
Desviación estanda	s=	20,44	
Coef de variación	CV=	0,1076	
Prom cuarto inf	qx1/4=	153,83	
Desviacion promedio	Desx=	17,640625	
Coef. de uniformidad	CU=	0,907	
Cv con desv promedio	CV=	0,0929	
Unif de distrib en ci	Udci=	0,8102	

CU= 90,7 %

•Eficiencia de distribución (Eda)

$$EDa = 100 + (606 - 24,9 \cdot f + 0,349 \cdot f^2 - 0,00186 \cdot f^3) \cdot \left[1 - \frac{CU}{100}\right]$$

EDa= 87,79 %

•Fracción de superficie adecuadamente regada

(Marco de riego 9 x 9)

f= 85 %    Introducir dato    Cultivos de valor medio o alto = 90 %  
 Cultivos de menor valor o forrajeros = 80 %

•Proporción efectiva de agua que llega al suelo (Pe)

$$Pe = 0,976 + 0,005 \cdot ETP - 0,00017 \cdot ETP^2 + 0,0012 \cdot V - IG \cdot (0,00043 \cdot ETP + 0,00018 \cdot V + 0,000016 \cdot ETP \cdot V)$$

Pe= 0,980

ETP=	3,75	mm/dia
v=	1,440	km/h
IG=	7	

•Perdidas por fugas en conducción (Pd)

0,99 < Pd < 1,0

Pd= 1

•Eficiencia de aplicación (Ea)

Ea = Eda · Pe · Pd

Ea = 86,07 %    0,861

CU=	0,907
CU=	90,7 %

Nº	Hi	Desvíos
1	165	79,359375
2	163	81,359375
3	180	64,359375
4	290	45,640625
5	195	49,359375
6	217	27,359375
7	223	21,359375
8	215	29,359375
9	165	79,359375
10	277	32,640625
11	195	49,359375
12	222	22,359375
13	247	2,640625
14	265	20,640625
15	279	34,640625
16	264	19,640625
17	150	94,359375
18	170	74,359375
19	192	52,359375
20	225	19,359375
21	255	10,640625
22	300	55,640625
23	300	55,640625
24	291	46,640625
25	162	82,359375
26	185	59,359375
27	217	27,359375
28	257	12,640625
29	292	47,640625
30	313	68,640625
31	318	73,640625
32	302	57,640625
33	165	79,359375
34	175	69,359375
35	222	22,359375
36	260	15,640625
37	295	50,640625
38	305	60,640625
39	316	71,640625
40	303	58,640625
41	155	89,359375
42	193	51,359375
43	233	11,359375
44	278	33,640625
45	303	58,640625
46	317	72,640625
47	318	73,640625
48	303	58,640625
49	157	87,359375
50	183	61,359375
51	223	21,359375
52	250	5,640625
53	287	42,640625
54	300	55,640625
55	317	72,640625
56	287	42,640625
57	182	62,359375
58	210	34,359375
59	240	4,359375
60	265	20,640625
61	265	20,640625
62	290	45,640625
63	285	40,640625
64	266	21,640625
Sumatoria	$\Sigma =$ 15639	3014,84375

Media  $qx = 244,359375$   
 Desviación estanda  $s = 53,32$   
 Coef de variación  $CV = 0,2182$   
 Prom cuarto inf  $qx1/4 = 201,67$   
 Desviacion promedio  $Desx = 47,1069336$   
 Coef. de uniformidad  $CU = 0,807$   
 Cv con desv promedio  $CV = 0,1928$   
 Unif de distrib en ci  $Udci = 0,8253$

CU= 80,7 %

•Eficiencia de distribución (Eda)

$$EDa = 100 + (606 - 24.9 \cdot f + 0.349 \cdot f^2 - 0.00186 \cdot f^3) \cdot \left[1 - \frac{CU}{100}\right]$$

EDa= 74,67 %

•Fracción de superficie adecuadamente regada

(Marco de riego 9 x 9)

f= 85 %    Introducir dato    Cultivos de valor medio o alto = 90 %  
 Cultivos de menor valor o forrajeros = 80 %

•Proporción efectiva de agua que llega al suelo (Pe)

$$Pe = 0.976 + 0.005 \cdot ETP - 0.00017 \cdot ETP^2 + 0.0012 \cdot V - IG \cdot (0.00043 \cdot ETP + 0.00018 \cdot V + 0.000016 \cdot ETP \cdot V)$$

Pe= 0,980

ETP =	3,55	mm/día
v =	2,520	km/h
IG =	7	

•Perdidas por fugas en conducción (Pd)

$0,99 < Pd < 1,0$

Pd = 1

•Eficiencia de aplicación (Ea)

$Ea = EDa \cdot Pe \cdot Pd$

Ea = 73,16 %    0,732

CU=	0,807	
CU=	80,7	%

Nº	Hi	Desvios
1	133	94,875
2	137	90,875
3	138	89,875
4	139	88,875
5	139	88,875
6	141	86,875
7	149	78,875
8	150	77,875
9	150	77,875
10	153	74,875
11	155	72,875
12	158	69,875
13	162	65,875
14	165	62,875
15	165	62,875
16	173	54,875
17	182	45,875
18	190	37,875
19	192	35,875
20	193	34,875
21	195	32,875
22	198	29,875
23	199	28,875
24	200	27,875
25	204	23,875
26	215	12,875
27	218	9,875
28	222	5,875
29	225	2,875
30	229	1,125
31	230	2,125
32	231	3,125
33	235	7,125
34	237	9,125
35	246	18,125
36	246	18,125
37	247	19,125
38	248	20,125
39	251	23,125
40	252	24,125
41	252	24,125
42	254	26,125
43	270	42,125
44	271	43,125
45	272	44,125
46	277	49,125
47	278	50,125
48	282	54,125
49	282	54,125
50	285	57,125
51	285	57,125
52	291	63,125
53	291	63,125
54	292	64,125
55	293	65,125
56	294	66,125
57	295	67,125
58	298	70,125
59	299	71,125
60	300	72,125
61	301	73,125
62	303	75,125
63	310	82,125
64	317	89,125

Sumatoria  
Media  
Desviación estanda  
Coef de variación  
Prom cuarto inf  
Desviacion promedio  
Coef. de uniformidad  
Cv con desv promedio  
Unif de distrib en ci

Σ= 14584 3136,75  
qx= 227,875  
s= 56,55  
CV= 0,2482  
qx1/4= 137,83  
Desx= 49,0117188  
CU= 0,785  
CV= 0,2151  
Udci= 0,6049

CU=	0,785
CU=	78,5 %

CU= 78,5 %

•Eficiencia de distribución (Eda)

$$EDa = 100 + (606 - 24.9 \cdot f + 0.349 \cdot f^2 - 0.00186 \cdot f^3) \cdot \left[1 - \frac{CU}{100}\right]$$

EDa= 71,78 %

•Fracción de superficie adecuadamente regada

(Marco de riego 9 x 9)

f= 85 % Introducir dato

Cultivos de valor medio o alto = 90 %

Cultivos de menor valor o forrajeros = 80 %

•Proporción efectiva de agua que llega al suelo (Pe)

$$Pe = 0.976 + 0.005 \cdot ETP - 0.00017 \cdot ETP^2 + 0.0012 \cdot V - IG \cdot (0.00043 \cdot ETP + 0.00018 \cdot V + 0.000016 \cdot ETP \cdot V)$$

Pe= 0,980

ETP =	3,55	mm/día
v =	2,520	km/h
IG =	7	

•Perdidas por fugas en conducción (Pd)

$$0,99 < Pd < 1,0$$

Pd = 1

•Eficiencia de aplicación (Ea)

$$Ea = EDa \cdot Pe \cdot Pd$$

Ea = 70,33 % 0,703

Nº	Hi	Desvios
1	168	70,515625
2	171	67,515625
3	171	67,515625
4	172	66,515625
5	172	66,515625
6	177	61,515625
7	185	53,515625
8	190	48,515625
9	192	46,515625
10	192	46,515625
11	200	38,515625
12	200	38,515625
13	205	33,515625
14	207	31,515625
15	207	31,515625
16	208	30,515625
17	210	28,515625
18	212	26,515625
19	213	25,515625
20	215	23,515625
21	215	23,515625
22	215	23,515625
23	215	23,515625
24	218	20,515625
25	220	18,515625
26	220	18,515625
27	222	16,515625
28	225	13,515625
29	230	8,515625
30	235	3,515625
31	236	2,515625
32	240	1,484375
33	242	3,484375
34	243	4,484375
35	245	6,484375
36	250	11,484375
37	250	11,484375
38	252	13,484375
39	253	14,484375
40	255	16,484375
41	260	21,484375
42	260	21,484375
43	262	23,484375
44	262	23,484375
45	262	23,484375
46	263	24,484375
47	266	27,484375
48	272	33,484375
49	273	34,484375
50	275	36,484375
51	275	36,484375
52	280	41,484375
53	280	41,484375
54	285	46,484375
55	290	51,484375
56	290	51,484375
57	292	53,484375
58	294	55,484375
59	295	56,484375
60	295	56,484375
61	295	56,484375
62	295	56,484375
63	296	57,484375
64	300	61,484375
Sumatoria	$\Sigma =$	15265 2151,96875
Media	$\bar{x} =$	238,515625
Desviación estanda	$s =$	39,02
Coef de variación	$CV =$	0,1636
Prom cuarto inf	$qx1/4 =$	171,83
Desviacion promedio	$Desx =$	33,6245117
Coef. de uniformidad	$CU =$	0,859
Cv con desv promedio	$CV =$	0,1410
Unif de distrib en c	$Udci =$	0,7204

CU= 85,9 %

•Eficiencia de distribución (Eda)

$$EDa = 100 + (606 - 24.9 \cdot f + 0.349 \cdot f^2 - 0.00186 \cdot f^3) \cdot \left[1 - \frac{CU}{100}\right]$$

Eda= 81,49 %

•Fracción de superficie adecuadamente regada

(Marco de riego 9 x 9)

f= 85 % Introducir dato Cultivos de valor medio o alto = 90 %  
Cultivos de menor valor o forrajeros = 80 %

•Proporción efectiva de agua que llega al suelo (Pe)

$$Pe = 0.976 + 0.005 \cdot ETP - 0.00017 \cdot ETP^2 + 0.0012 \cdot V - IG \cdot (0.00043 \cdot ETP + 0.00018 \cdot V + 0.000016 \cdot ETP \cdot V)$$

Pe= 0,981

ETP =	4,05	mm/día
v =	1,440	km/h
IG =	7	

•Perdidas por fugas en conducción (Pd)

0,99 < Pd < 1,0

Pd = 1

•Eficiencia de aplicación (Ea)

$Ea = Eda \cdot Pe \cdot Pd$

Ea = 79,91 % 0,799

CU=	0,859
CU=	85,9 %

**Anexo 9. Resultados obtenidos del parámetro de Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CU %) y Eficiencia de aplicación (EA %), bajo incidencia del viento aspersor 423 AG**

Nº	Hi	Desvios						
1	25	37,57988	56	55	7,57988	116	65	2,42012
2	25	37,57988	57	55	7,57988	117	67	4,42012
3	32	30,57988	58	55	7,57988	118	67	4,42012
4	36	26,57988	59	55	7,57988	119	68	5,42012
5	39	23,57988	60	55	7,57988	120	68	5,42012
6	39	23,57988	61	55	7,57988	121	68	5,42012
7	40	22,57988	62	55	7,57988	122	68	5,42012
8	40	22,57988	63	55	7,57988	123	70	7,42012
9	40	22,57988	64	55	7,57988	124	70	7,42012
10	40	22,57988	65	55	7,57988	125	70	7,42012
11	42	20,57988	66	55	7,57988	126	70	7,42012
12	45	17,57988	67	55	7,57988	127	70	7,42012
13	45	17,57988	68	55	7,57988	128	70	7,42012
14	45	17,57988	69	55	7,57988	129	70	7,42012
15	45	17,57988	70	55	7,57988	130	70	7,42012
16	45	17,57988	71	55	7,57988	131	70	7,42012
17	45	17,57988	72	55	7,57988	132	72	9,42012
18	45	17,57988	73	55	7,57988	133	75	12,42012
19	45	17,57988	74	55	7,57988	134	75	12,42012
20	45	17,57988	75	55	7,57988	135	75	12,42012
21	45	17,57988	76	55	7,57988	136	77	14,42012
22	48	14,57988	77	55	7,57988	137	78	15,42012
23	48	14,57988	78	57	5,57988	138	80	17,42012
24	48	14,57988	79	57	5,57988	139	80	17,42012
25	48	14,57988	80	57	5,57988	140	80	17,42012
26	48	14,57988	81	57	5,57988	141	80	17,42012
27	48	14,57988	82	58	4,57988	142	80	17,42012
28	50	12,57988	83	60	2,57988	143	80	17,42012
29	50	12,57988	84	60	2,57988	144	80	17,42012
30	50	12,57988	85	60	2,57988	145	80	17,42012
31	50	12,57988	86	60	2,57988	146	80	17,42012
32	50	12,57988	87	60	2,57988	147	80	17,42012
33	50	12,57988	88	60	2,57988	148	80	17,42012
34	50	12,57988	89	60	2,57988	149	80	17,42012
35	50	12,57988	90	60	2,57988	150	81	18,42012
36	50	12,57988	91	60	2,57988	151	82	19,42012
37	50	12,57988	92	60	2,57988	152	85	22,42012
38	50	12,57988	93	60	2,57988	153	85	22,42012
39	50	12,57988	94	60	2,57988	154	85	22,42012
40	50	12,57988	95	60	2,57988	155	85	22,42012
41	50	12,57988	96	63	0,42012	156	88	25,42012
42	50	12,57988	97	63	0,42012	157	90	27,42012
43	50	12,57988	98	64	1,42012	158	90	27,42012
44	50	12,57988	99	65	2,42012	159	95	32,42012
45	50	12,57988	100	65	2,42012	160	95	32,42012
46	50	12,57988	101	65	2,42012	161	98	35,42012
47	50	12,57988	102	65	2,42012	162	100	37,42012
48	50	12,57988	103	65	2,42012	163	100	37,42012
49	52	10,57988	104	65	2,42012	164	100	37,42012
50	52	10,57988	105	65	2,42012	165	110	47,42012
51	53	9,57988	106	65	2,42012	166	110	47,42012
52	55	7,57988	107	65	2,42012	167	110	47,42012
53	55	7,57988	108	65	2,42012	168	115	52,42012
54	55	7,57988	109	65	2,42012	169	125	62,42012
55	55	7,57988	110	65	2,42012			
			111	65	2,42012			
			112	65	2,42012			
			113	65	2,42012			
			114	65	2,42012			
			115	65	2,42012			
						<b>Σ=</b>	<b>10576</b>	<b>2212,177515</b>

$$CU = 79,10 \%$$

• **Eficiencia de distribución (Eda)**

$$EDa = 100 + (606 - 24,9 \cdot f + 0,349 \cdot f^2 - 0,00186 \cdot f^3) \cdot \left[ 1 - \frac{CU}{100} \right]$$

$$EDa = 72,57 \%$$

• **Fracción de superficie adecuadamente regada**

(Marco de riego 14 x 14)

$$f = 85 \%$$

Introducir dato

Cultivos de valor medio o alto = 90 %

Cultivos de menor valor o forrajeros = 80 %

• **Proporción efectiva de agua que llega al suelo (Pe)**

$$Pe = 0,976 + 0,005 \cdot ETP - 0,00017 \cdot ETP^2 + 0,0012 \cdot V - IG \cdot (0,00043 \cdot ETP + 0,00018 \cdot V + 0,000016 \cdot ETP \cdot V)$$

$$Pe = 0,980$$

ETP =	4,38	mm/día
v =	2,88	km/h
IG =	7	

• **Perdidas por fugas en conducción (Pd)**

$$0,99 < Pd < 1,0$$

$$Pd = 1$$

• **Eficiencia de aplicación (Ea)**

$$Ea = EDa \cdot Pe \cdot Pd$$

$$Ea = 71,11 \%$$

$$0,711$$

Nº	Hi	Desvios						
1	30	50,2426	56	80	0,2426	116	90	9,7574
2	30	50,2426	57	80	0,2426	117	90	9,7574
3	30	50,2426	58	80	0,2426	118	90	9,7574
4	43	37,2426	59	80	0,2426	119	90	9,7574
5	44	36,2426	60	80	0,2426	120	90	9,7574
6	45	35,2426	61	80	0,2426	121	90	9,7574
7	45	35,2426	62	80	0,2426	122	90	9,7574
8	45	35,2426	63	80	0,2426	123	91	10,7574
9	45	35,2426	64	80	0,2426	124	92	11,7574
10	45	35,2426	65	80	0,2426	125	92	11,7574
11	48	32,2426	66	81	0,7574	126	92	11,7574
12	50	30,2426	67	81	0,7574	127	93	12,7574
13	50	30,2426	68	81	0,7574	128	93	12,7574
14	50	30,2426	69	82	1,7574	129	93	12,7574
15	50	30,2426	70	82	1,7574	130	93	12,7574
16	50	30,2426	71	82	1,7574	131	93	12,7574
17	50	30,2426	72	82	1,7574	132	94	13,7574
18	50	30,2426	73	82	1,7574	133	94	13,7574
19	50	30,2426	74	82	1,7574	134	94	13,7574
20	55	25,2426	75	82	1,7574	135	94	13,7574
21	55	25,2426	76	83	2,7574	136	95	14,7574
22	55	25,2426	77	84	3,7574	137	95	14,7574
23	55	25,2426	78	85	4,7574	138	95	14,7574
24	55	25,2426	79	85	4,7574	139	95	14,7574
25	56	24,2426	80	85	4,7574	140	95	14,7574
26	57	23,2426	81	85	4,7574	141	95	14,7574
27	57	23,2426	82	85	4,7574	142	95	14,7574
28	60	20,2426	83	85	4,7574	143	95	14,7574
29	60	20,2426	84	85	4,7574	144	95	14,7574
30	63	17,2426	85	85	4,7574	145	95	14,7574
31	65	15,2426	86	85	4,7574	146	95	14,7574
32	65	15,2426	87	85	4,7574	147	95	14,7574
33	65	15,2426	88	85	4,7574	148	95	14,7574
34	67	13,2426	89	85	4,7574	149	95	14,7574
35	70	10,2426	90	85	4,7574	150	96	15,7574
36	70	10,2426	91	85	4,7574	151	96	15,7574
37	70	10,2426	92	85	4,7574	152	96	15,7574
38	70	10,2426	93	85	4,7574	153	96	15,7574
39	70	10,2426	94	85	4,7574	154	96	15,7574
40	72	8,2426	95	85	4,7574	155	98	17,7574
41	74	6,2426	96	85	4,7574	156	99	18,7574
42	75	5,2426	97	85	4,7574	157	100	19,7574
43	75	5,2426	98	86	5,7574	158	100	19,7574
44	75	5,2426	99	86	5,7574	159	100	19,7574
45	75	5,2426	100	86	5,7574	160	100	19,7574
46	75	5,2426	101	87	6,7574	161	100	19,7574
47	75	5,2426	102	87	6,7574	162	100	19,7574
48	76	4,2426	103	87	6,7574	163	100	19,7574
49	77	3,2426	104	88	7,7574	164	100	19,7574
50	77	3,2426	105	90	9,7574	165	104	23,7574
51	78	2,2426	106	90	9,7574	166	104	23,7574
52	78	2,2426	107	90	9,7574	167	105	24,7574
53	80	0,2426	108	90	9,7574	168	105	24,7574
54	80	0,2426	109	90	9,7574	169	105	24,7574
55	80	0,2426	110	90	9,7574			
			111	90	9,7574			
			112	90	9,7574			
			113	90	9,7574			
			114	90	9,7574			
			115	90	9,7574			
						<b>Σ=</b>	<b>13561</b>	<b>2207,53846</b>

$$CU = 83,70 \%$$

• **Eficiencia de distribución (Eda)**

$$EDa = 100 + (606 - 24,9 \cdot f + 0,349 \cdot f^2 - 0,00186 \cdot f^3) \cdot \left[ 1 - \frac{CU}{100} \right]$$

$$EDa = 78,61 \%$$

• **Fracción de superficie adecuadamente regada**

(Marco de riego 14 x 14)

$$f = 85 \%$$

Introducir dato

Cultivos de valor medio o alto = 90 %

Cultivos de menor valor o forrajeros = 80 %

• **Proporción efectiva de agua que llega al suelo (Pe)**

$$Pe = 0,976 + 0,005 \cdot ETP - 0,00017 \cdot ETP^2 + 0,0012 \cdot V - IG \cdot (0,00043 \cdot ETP + 0,00018 \cdot V + 0,000016 \cdot ETP \cdot V)$$

$$Pe = 0,980$$

$ETP =$	4,57	mm/día
$v =$	2,88	km/h
$IG =$	7	

• **Perdidas por fugas en conducción (Pd)**

$$0,99 < Pd < 1,0$$

$$Pd = 1$$

• **Eficiencia de aplicación (Ea)**

$$Ea = EDa \cdot Pe \cdot Pd$$

$$Ea = 77,03 \%$$

$$0,770$$

Nº	Hi	Desvios						
1	35	35,48521	56	65	5,48521	116	78	7,51479
2	40	30,48521	57	65	5,48521	117	79	8,51479
3	40	30,48521	58	65	5,48521	118	80	9,51479
4	40	30,48521	59	67	3,48521	119	80	9,51479
5	45	25,48521	60	67	3,48521	120	80	9,51479
6	48	22,48521	61	67	3,48521	121	80	9,51479
7	49	21,48521	62	68	2,48521	122	80	9,51479
8	49	21,48521	63	68	2,48521	123	80	9,51479
9	50	20,48521	64	68	2,48521	124	80	9,51479
10	50	20,48521	65	68	2,48521	125	80	9,51479
11	50	20,48521	66	68	2,48521	126	80	9,51479
12	50	20,48521	67	68	2,48521	127	80	9,51479
13	50	20,48521	68	68	2,48521	128	80	9,51479
14	50	20,48521	69	68	2,48521	129	80	9,51479
15	50	20,48521	70	70	0,48521	130	80	9,51479
16	50	20,48521	71	70	0,48521	131	80	9,51479
17	50	20,48521	72	70	0,48521	132	80	9,51479
18	50	20,48521	73	70	0,48521	133	81	10,51479
19	50	20,48521	74	70	0,48521	134	82	11,51479
20	55	15,48521	75	70	0,48521	135	82	11,51479
21	55	15,48521	76	70	0,48521	136	83	12,51479
22	55	15,48521	77	70	0,48521	137	84	13,51479
23	55	15,48521	78	70	0,48521	138	85	14,51479
24	55	15,48521	79	70	0,48521	139	85	14,51479
25	55	15,48521	80	70	0,48521	140	85	14,51479
26	55	15,48521	81	70	0,48521	141	85	14,51479
27	55	15,48521	82	70	0,48521	142	85	14,51479
28	55	15,48521	83	70	0,48521	143	85	14,51479
29	55	15,48521	84	70	0,48521	144	85	14,51479
30	57	13,48521	85	70	0,48521	145	85	14,51479
31	57	13,48521	86	70	0,48521	146	85	14,51479
32	57	13,48521	87	70	0,48521	147	85	14,51479
33	57	13,48521	88	70	0,48521	148	85	14,51479
34	58	12,48521	89	70	0,48521	149	87	16,51479
35	60	10,48521	90	72	1,51479	150	87	16,51479
36	60	10,48521	91	72	1,51479	151	87	16,51479
37	60	10,48521	92	72	1,51479	152	88	17,51479
38	60	10,48521	93	73	2,51479	153	88	17,51479
39	60	10,48521	94	74	3,51479	154	88	17,51479
40	60	10,48521	95	75	4,51479	155	88	17,51479
41	60	10,48521	96	75	4,51479	156	90	19,51479
42	60	10,48521	97	75	4,51479	157	90	19,51479
43	60	10,48521	98	75	4,51479	158	90	19,51479
44	60	10,48521	99	75	4,51479	159	90	19,51479
45	60	10,48521	100	75	4,51479	160	90	19,51479
46	60	10,48521	101	75	4,51479	161	90	19,51479
47	60	10,48521	102	75	4,51479	162	90	19,51479
48	60	10,48521	103	75	4,51479	163	90	19,51479
49	63	7,48521	104	75	4,51479	164	92	21,51479
50	63	7,48521	105	75	4,51479	165	93	22,51479
51	63	7,48521	106	75	4,51479	166	95	24,51479
52	65	5,48521	107	75	4,51479	167	95	24,51479
53	65	5,48521	108	75	4,51479	168	95	24,51479
54	65	5,48521	109	75	4,51479	169	97	26,51479
55	65	5,48521	110	75	4,51479			
			111	75	4,51479			
			112	75	4,51479			
			113	78	7,51479			
			114	78	7,51479			
			115	78	7,51479			
						<b>Σ=</b>	<b>11912</b>	<b>1824,36686</b>

$$CU = 84,70 \%$$

• **Eficiencia de distribución (Eda)**

$$EDa = 100 + (606 - 24,9 \cdot f + 0,349 \cdot f^2 - 0,00186 \cdot f^3) \cdot \left[ 1 - \frac{CU}{100} \right]$$

$$EDa = 79,92 \%$$

• **Fracción de superficie adecuadamente regada**

(Marco de riego 14 x 14)

$$f = 85 \%$$

Introducir dato

Cultivos de valor medio o alto = 90 %

Cultivos de menor valor o forrajeros = 80 %

• **Proporción efectiva de agua que llega al suelo (Pe)**

$$Pe = 0,976 + 0,005 \cdot ETP - 0,00017 \cdot ETP^2 + 0,0012 \cdot V - IG \cdot (0,00043 \cdot ETP + 0,00018 \cdot V + 0,000016 \cdot ETP \cdot V)$$

$$Pe = 0,980$$

<b>ETP =</b>	<b>4,57</b>	mm/día
<b>v =</b>	<b>2,88</b>	km/h
<b>IG =</b>	<b>7</b>	

• **Perdidas por fugas en conducción (Pd)**

$$0,99 < Pd < 1,0$$

$$Pd = 1$$

• **Eficiencia de aplicación (Ea)**

$$Ea = EDa \cdot Pe \cdot Pd$$

$$Ea = 78,31 \%$$

$$0,783$$

Nº	Hi	Desvios						
1	57	33,79882	56	75	15,79882	116	100	9,20118
2	57	33,79882	57	75	15,79882	117	100	9,20118
3	58	32,79882	58	75	15,79882	118	100	9,20118
4	60	30,79882	59	75	15,79882	119	100	9,20118
5	60	30,79882	60	75	15,79882	120	102	11,20118
6	60	30,79882	61	75	15,79882	121	105	14,20118
7	60	30,79882	62	75	15,79882	122	105	14,20118
8	60	30,79882	63	75	15,79882	123	105	14,20118
9	60	30,79882	64	75	15,79882	124	105	14,20118
10	63	27,79882	65	76	14,79882	125	105	14,20118
11	63	27,79882	66	80	10,79882	126	105	14,20118
12	64	26,79882	67	80	10,79882	127	107	16,20118
13	65	25,79882	68	80	10,79882	128	108	17,20118
14	65	25,79882	69	80	10,79882	129	110	19,20118
15	65	25,79882	70	80	10,79882	130	110	19,20118
16	65	25,79882	71	80	10,79882	131	110	19,20118
17	65	25,79882	72	80	10,79882	132	110	19,20118
18	65	25,79882	73	80	10,79882	133	110	19,20118
19	65	25,79882	74	82	8,79882	134	110	19,20118
20	65	25,79882	75	82	8,79882	135	110	19,20118
21	65	25,79882	76	82	8,79882	136	110	19,20118
22	65	25,79882	77	85	5,79882	137	112	21,20118
23	65	25,79882	78	85	5,79882	138	112	21,20118
24	65	25,79882	79	85	5,79882	139	115	24,20118
25	65	25,79882	80	85	5,79882	140	115	24,20118
26	65	25,79882	81	85	5,79882	141	115	24,20118
27	68	22,79882	82	85	5,79882	142	115	24,20118
28	68	22,79882	83	87	3,79882	143	115	24,20118
29	68	22,79882	84	87	3,79882	144	117	26,20118
30	70	20,79882	85	90	0,79882	145	118	27,20118
31	70	20,79882	86	90	0,79882	146	118	27,20118
32	70	20,79882	87	90	0,79882	147	120	29,20118
33	70	20,79882	88	90	0,79882	148	120	29,20118
34	70	20,79882	89	90	0,79882	149	120	29,20118
35	70	20,79882	90	90	0,79882	150	120	29,20118
36	70	20,79882	91	90	0,79882	151	125	34,20118
37	70	20,79882	92	90	0,79882	152	125	34,20118
38	70	20,79882	93	90	0,79882	153	125	34,20118
39	70	20,79882	94	90	0,79882	154	125	34,20118
40	70	20,79882	95	90	0,79882	155	127	36,20118
41	70	20,79882	96	90	0,79882	156	130	39,20118
42	70	20,79882	97	92	1,20118	157	130	39,20118
43	70	20,79882	98	95	4,20118	158	130	39,20118
44	72	18,79882	99	95	4,20118	159	130	39,20118
45	72	18,79882	100	95	4,20118	160	130	39,20118
46	73	17,79882	101	95	4,20118	161	135	44,20118
47	73	17,79882	102	95	4,20118	162	140	49,20118
48	73	17,79882	103	95	4,20118	163	140	49,20118
49	75	15,79882	104	95	4,20118	164	140	49,20118
50	75	15,79882	105	95	4,20118	165	140	49,20118
51	75	15,79882	106	95	4,20118	166	140	49,20118
52	75	15,79882	107	98	7,20118	167	140	49,20118
53	75	15,79882	108	98	7,20118	168	143	52,20118
54	75	15,79882	109	100	9,20118	169	143	52,20118
55	75	15,79882	110	100	9,20118			
			111	100	9,20118			
			112	100	9,20118			
			113	100	9,20118			
			114	100	9,20118			
			115	100	9,20118			
						<b>Σ=</b>	<b>15345</b>	<b>3223,37278</b>

$$CU = 79,00 \%$$

• **Eficiencia de distribución (Eda)**

$$EDa = 100 + (606 - 24,9 \cdot f + 0,349 \cdot f^2 - 0,00186 \cdot f^3) \cdot \left[ 1 - \frac{CU}{100} \right]$$

$$EDa = 72,44 \%$$

• **Fracción de superficie adecuadamente regada**

(Marco de riego 14 x 14)

$$f = 85 \%$$

Introducir dato

Cultivos de valor medio o alto = 90 %

Cultivos de menor valor o forrajeros = 80 %

• **Proporción efectiva de agua que llega al suelo (Pe)**

$$Pe = 0,976 + 0,005 \cdot ETP - 0,00017 \cdot ETP^2 + 0,0012 \cdot V - IG \cdot (0,00043 \cdot ETP + 0,00018 \cdot V + 0,000016 \cdot ETP \cdot V)$$

$$Pe = 0,979$$

<b>ETP =</b>	4,60	mm/día
<b>v =</b>	3,60	km/h
<b>IG =</b>	7	

• **Perdidas por fugas en conducción (Pd)**

$$0,99 < Pd < 1,0$$

$$Pd = 1$$

• **Eficiencia de aplicación (Ea)**

$$Ea = EDa \cdot Pe \cdot Pd$$

$$Ea = 70,95 \%$$

$$0,710$$

Nº	Hi	Desvios
1	55	24,1183
2	55	24,1183
3	55	24,1183
4	55	24,1183
5	55	24,1183
6	55	24,1183
7	55	24,1183
8	60	19,1183
9	60	19,1183
10	60	19,1183
11	60	19,1183
12	60	19,1183
13	60	19,1183
14	60	19,1183
15	60	19,1183
16	60	19,1183
17	60	19,1183
18	60	19,1183
19	60	19,1183
20	60	19,1183
21	60	19,1183
22	60	19,1183
23	60	19,1183
24	60	19,1183
25	60	19,1183
26	60	19,1183
27	62	17,1183
28	62	17,1183
29	62	17,1183
30	62	17,1183
31	63	16,1183
32	63	16,1183
33	64	15,1183
34	65	14,1183
35	65	14,1183
36	65	14,1183
37	65	14,1183
38	65	14,1183
39	65	14,1183
40	65	14,1183
41	65	14,1183
42	65	14,1183
43	65	14,1183
44	65	14,1183
45	65	14,1183
46	65	14,1183
47	65	14,1183
48	65	14,1183
49	65	14,1183
50	66	13,1183
51	68	11,1183
52	68	11,1183
53	68	11,1183
54	68	11,1183
55	70	9,1183

56	70	9,1183
57	70	9,1183
58	70	9,1183
59	70	9,1183
60	70	9,1183
61	70	9,1183
62	70	9,1183
63	70	9,1183
64	70	9,1183
65	70	9,1183
66	70	9,1183
67	72	7,1183
68	72	7,1183
69	72	7,1183
70	72	7,1183
71	73	6,1183
72	73	6,1183
73	74	5,1183
74	75	4,1183
75	75	4,1183
76	75	4,1183
77	75	4,1183
78	75	4,1183
79	75	4,1183
80	75	4,1183
81	75	4,1183
82	75	4,1183
83	75	4,1183
84	75	4,1183
85	78	1,1183
86	78	1,1183
87	80	0,8817
88	80	0,8817
89	80	0,8817
90	80	0,8817
91	80	0,8817
92	80	0,8817
93	80	0,8817
94	80	0,8817
95	80	0,8817
96	80	0,8817
97	80	0,8817
98	80	0,8817
99	80	0,8817
100	80	0,8817
101	80	0,8817
102	80	0,8817
103	80	0,8817
104	80	0,8817
105	80	0,8817
106	80	0,8817
107	82	2,8817
108	82	2,8817
109	83	3,8817
110	83	3,8817
111	85	5,8817
112	85	5,8817
113	85	5,8817
114	85	5,8817
115	85	5,8817

116	85	5,8817
117	85	5,8817
118	85	5,8817
119	85	5,8817
120	85	5,8817
121	85	5,8817
122	90	10,8817
123	90	10,8817
124	90	10,8817
125	90	10,8817
126	90	10,8817
127	92	12,8817
128	92	12,8817
129	93	13,8817
130	95	15,8817
131	95	15,8817
132	95	15,8817
133	95	15,8817
134	95	15,8817
135	95	15,8817
136	95	15,8817
137	95	15,8817
138	98	18,8817
139	98	18,8817
140	100	20,8817
141	100	20,8817
142	100	20,8817
143	100	20,8817
144	100	20,8817
145	100	20,8817
146	100	20,8817
147	100	20,8817
148	100	20,8817
149	100	20,8817
150	100	20,8817
151	100	20,8817
152	103	23,8817
153	103	23,8817
154	105	25,8817
155	105	25,8817
156	105	25,8817
157	105	25,8817
158	105	25,8817
159	105	25,8817
160	107	27,8817
161	110	30,8817
162	110	30,8817
163	110	30,8817
164	110	30,8817
165	110	30,8817
166	115	35,8817
167	115	35,8817
168	115	35,8817
169	115	35,8817
<b>Σ=</b>	<b>13371</b>	<b>2268,3550</b>

$$CU = 83,00 \%$$

• **Eficiencia de distribución (Eda)**

$$EDa = 100 + (606 - 24.9 \cdot f + 0.349 \cdot f^2 - 0.00186 \cdot f^3) \cdot \left[1 - \frac{CU}{100}\right]$$

$$EDa = 77,69 \%$$

• **Fracción de superficie adecuadamente regada**

(Marco de riego 14 x 14)

$$f = 85 \%$$

Introducir dato

Cultivos de valor medio o alto = 90 %

Cultivos de menor valor o forrajeros = 80 %

• **Proporción efectiva de agua que llega al suelo (Pe)**

$$Pe = 0.976 + 0.005 \cdot ETP - 0.00017 \cdot ETP^2 + 0.0012 \cdot V - IG \cdot (0.00043 \cdot ETP + 0.00018 \cdot V + 0.000016 \cdot ETP \cdot V)$$

$$Pe = 0,979$$

<b>ETP =</b>	4,6	mm/día
<b>v =</b>	3,60	km/h
<b>IG =</b>	7	

• **Perdidas por fugas en conducción (Pd)**

$$0,99 < Pd < 1,0$$

$$Pd = 1$$

• **Eficiencia de aplicación (Ea)**

$$Ea = EDa \cdot Pe \cdot Pd$$

$$Ea = 76,09 \%$$

$$0,761$$





**Anexo 12. Recopilación de datos climáticos de la estación meteorológica situada en las instalaciones de la carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad Pública de El Alto**

