



UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA

CARRERA: INGENIERÍA CIVIL
INFORME FINAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

**ESTUDIO DE LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA
EN SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN**

ELABORADO POR:


REYES ÁLAVA JOSUÉ LUIS
SANTANA QUIROZ NAYELY JUDY

TUTOR (A):

ING. RAMÓN PEREZ LEIRA

MANTA – MANABÍ – ECUADOR

Febrero 2026

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1 Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

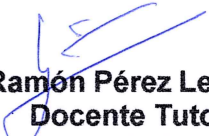
Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante SANTANA QUIROZ NAYELY JUDY, legalmente matriculado/a en la carrera de Ingeniería Civil, período académico 2025-2026, cumpliendo el total de 384. horas, cuyo título del proyecto es **"ESTUDIO DE LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN"**.

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 9 de febrero de 2026.


Lo certifico,


Ing. Ramón Pérez Leira, PhD.
Docente Tutor
Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura

Nota 1: Este documento debe ser realizado únicamente por el/la docente tutor/a y será receptado sin enmendaduras y con firma física original.

Nota 2: Este es un formato que se llenará por cada estudiante (de forma individual) y será otorgado cuando el informe de similitud sea favorable y además las fases de la Unidad de Integración Curricular estén aprobadas.

14 (catorce)

 Uleam UNIVERSIDAD ELOY ALFARO DE MANABÍ	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1
		Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

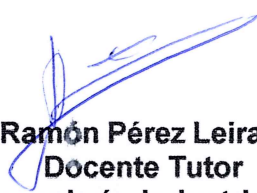
Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante REYES ÁLAVA JOSUÉ LUIS, legalmente matriculado/a en la carrera de Ingeniería Civil, período académico 2025-2026, cumpliendo el total de 384. horas, cuyo título del proyecto es **"ESTUDIO DE LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN"**.

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 9 de febrero de 2026.

Lo certifico,


Ing. Ramón Pérez Leira, PhD.
Docente Tutor
Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura

Nota 1: Este documento debe ser realizado únicamente por el/la docente tutor/a y será receptado sin enmendaduras y con firma física original.

Nota 2: Este es un formato que se llenará por cada estudiante (de forma individual) y será otorgado cuando el informe de similitud sea favorable y además las fases de la Unidad de Integración Curricular estén aprobadas.

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo, NAYELY JUDY SANTANA QUIROZ con CC: 1317198560, doy constancia de ser el autor del Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto de Investigación con el tema **"ESTUDIO DE LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN"**, el cual fue dirigido por el tutor, Ing. Ramón Pérez Leira, PhD.

Quiero resaltar la originalidad de este trabajo, que se fundamenta en la contribución de varios autores que enriquecieron la investigación, así como en la recopilación de datos e información provenientes de fuentes bibliográficas, visitas de campo, entre otros recursos.

En la ciudad de Manta, a los 30 días del mes de enero de dos mil veinte y seis.



Nayely Judy Santana Quiroz

C.C. 1317198560

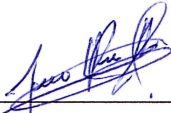
Autor

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo, JOSUE LUIS REYES ALAVA con CC: 1350632657, doy constancia de ser el autor del Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto de Investigación con el tema "**ESTUDIO DE LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN**", el cual fue dirigido por el tutor, Ing. Ramón Pérez Leira, PhD.

Quiero resaltar la originalidad de este trabajo, que se fundamenta en la contribución de varios autores que enriquecieron la investigación, así como en la recopilación de datos e información provenientes de fuentes bibliográficas, visitas de campo, entre otros recursos.

En la ciudad de Manta, a los 30 días del mes de enero de dos mil veinte y seis.



Josue Luis Reyes Alava

C.C. 1350632657

Autor

CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

En calidad de tribunales de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, certifico:

Haber revisado el trabajo de titulación, bajo la modalidad de **Proyecto de Investigación**, cuyo tema es "**ESTUDIO DE LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN**" de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo APRUEBO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para proceder a la defensa correspondiente.

Certifico lo anterior para los fines pertinentes, a salvo disposición de Ley en contrario.
En la ciudad de *Manta*, a los 24 días del mes de febrero de dos mil veinte y seis.



Ing. Eric Cabrera Estupiñán, PhD
C.C. 0959619834
Tribunal 1



Ing. Horacio Muñoz Cedeño, Mg
C.C. 1308732229
Tribunal 2

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios, por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesaria para culminar esta etapa tan importante de mi formación personal. Por iluminar mi camino en los momentos de dificultad y permitirme alcanzar esta meta.

A mis padres, quienes han sido mi mayor inspiración y apoyo incondicional. Gracias por su amor, sus enseñanzas y por inculcarme valores como la responsabilidad, la honestidad y la perseverancia, que han sido esenciales para alcanzar esta meta. Por su sacrificio, esfuerzo constante y por creer en mí cuando yo dudaba. Este logro no me pertenece únicamente a mí, sino también a ustedes.

A la señora Johana Zamora y a mis hermanos, por su apoyo constante y palabras de aliento a lo largo de este proceso.

A mi abuelo, Luis Marcial Reyes Calderón, por todos sus consejos, enseñanzas y ejemplo de perseverancia, quien siempre me ánimo a seguir adelante y me inspiró a seguir esta hermosa carrera.

A mi pareja, Nayely Santana, quien ha sido un apoyo fundamental en todo este proceso. Gracias por tu amor, comprensión y paciencia. Gracias por caminar a mi lado y ser parte esencial de esta meta alcanzada.

A nuestros amigos y compañeros, quienes me brindaron ánimo, motivación y alegría en esta etapa universitaria. A Dagmar e Israel, mis amigos desde primer semestre. A Kenneck, Hipson y Luiggi, por ser parte de este proceso en estos últimos semestres.

Y a todas aquellas personas que, directa o indirectamente, contribuyeron a la realización de este sueño.

Gracias infinitas.

Josué Luis Reyes Alava

C.I. 1350632657

Autor

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Ramón Pérez Leira, tutor y guía. Gracias por compartir su conocimiento, por su paciencia infinita, por corregirnos con sabiduría y por motivarnos siempre a dar lo mejor. Su dedicación fue clave para la culminación de este trabajo.

A la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, nuestra alma máter, por brindarme la oportunidad de formarme académica y profesionalmente.

A la familia de agricultores de Río Chico, sector El Pechiche, por su invaluable colaboración, por permitirnos acceder a su terreno y sistemas de riego, y por compartir su tiempo y experiencia. Este trabajo no habría sido posible sin ustedes.

Expreso mi profundo agradecimiento al Ing. Alex Junqui, por su apoyo y orientación a lo largo de mi formación académica. Gracias por su disposición para ayudar, por su guía y respaldo necesario ante cualquier dificultad.

Extiendo también mi gratitud a cada docente que formó parte de mi formación, por compartir sus conocimientos y por su entrega durante estos años.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, con un gesto, una palabra o una acción, contribuyeron a que este proyecto sea hoy una realidad.

Gracias totales.

Josué Luis Reyes Alava

C.I. 1350632657

Autor

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios, por ser mi fortaleza en los momentos difíciles, por guiar mis pasos y permitirme alcanzar esta meta tan anhelada. A Él sea la gloria.

A mis padres, pilares fundamentales en mi vida. Gracias por su amor inagotable, por sus sacrificios y por enseñarnos que con esfuerzo, dedicación y humildad se pueden alcanzar los sueños más grandes. Cada página de esta tesis lleva impreso su apoyo incondicional. Este logro no es solo mío, es también de ustedes. Gracias por creer en mí incluso cuando dudaba.

A mi pareja, Josué Reyes por su cariño, su paciencia y por estar siempre presente, celebrando mis triunfos y apoyándome en las dificultades.

A nuestros amigos y compañeros, por compartir risas, aprendizajes y momentos inolvidables durante esta etapa universitaria. A Iván Minchala por su compañía y apoyo constante e incondicional desde primer semestre. A Hipson, Luiggi y Kenneck por ser un grupo que me ayudo y sustentó en estos últimos semestres. Gracias por hacer este camino más llevadero.

Y a todas aquellas personas que, directa o indirectamente, contribuyeron a la realización de este sueño.

Gracias infinitas.

Nayely Judy Santana Quiroz

C.I. 1317198560

Autora

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Ramón Pérez Leira, tutor y guía. Gracias por compartir su conocimiento, por su paciencia infinita, por corregirnos con sabiduría y por motivarnos siempre a dar lo mejor. Su dedicación fue clave para la culminación de este trabajo.

A la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, nuestra alma máter, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme académicamente.

A la familia de agricultores de Río Chico, sector El Pechiche, por su invaluable colaboración, por permitirnos acceder a su terreno y sistemas de riego, y por compartir su tiempo y experiencia. Este trabajo no habría sido posible sin ustedes.

Extiendo también mi gratitud a cada docente que formó parte de mi formación, por compartir sus conocimientos y por su entrega durante estos años.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, con un gesto, una palabra o una acción, contribuyeron a que este proyecto sea hoy una realidad.

Gracias totales.

Nayely Judy Santana Quiroz

C.I. 1317198560

Autora

RESUMEN

En la actualidad, existe una gran necesidad de optimizar el uso del agua en la agricultura, problemática relevante en Manabí debido a la escasez hídrica. Es por eso, que la investigación analizó la distribución del agua en un sistema de riego por aspersión operando en condiciones reales en el sector El Pechiche, Portoviejo

La metodología utilizó un enfoque experimental dual: ensayos radiales con un aspersor aislado (ASPE000114 ½") a presiones de 1.95, 0.9 y 0.8 atm, con pluviómetros cada 0.5 m; y ensayos de campo completo con cuatro aspersores en configuraciones 7×8 m (original) y 6×7 m (optimizada), con malla de colectores de 1×1 m. Se midió la humedad del suelo antes y después del riego con sensor DELTA-T HH2. Los datos se procesaron con el software Catch3D para simular escenarios y calcular el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), Uniformidad de Distribución (DU) y eficiencia de aplicación.

Los resultados evidenciaron que el aspersor presenta un patrón de distribución radial tipo "rosquilla". En la configuración original de 7×8 m, el CUC fue de 64.5%, clasificado como "pobre" según la norma ISO 15886. Tras las simulaciones, se determinó que el espaciamiento 7x7 m ofrecía el mejor equilibrio entre uniformidad y costo, alcanzando un CUC más alto en simulaciones, faltando su validación de campo. El análisis de humedad del suelo demostró que el suelo franco-arcilloso de la zona tiene capacidad de redistribución horizontal, reduciendo la desviación estándar de la humedad de 1.9% a 0.8% en cuatro días.

Finalmente, se elaboró un plan de mejora técnica por etapas, priorizando la reconfiguración del marco de riego a 7×7 m (inversión baja), la optimización de la presión de operación (inversión elevada) y acciones complementarias como riego nocturno, limpieza periódica de boquillas y monitoreo sistemático. Se concluye que la baja eficiencia de riego es un problema técnico con solución técnica, y que mediante evaluaciones y ajustes estratégicos es posible optimizar significativamente el uso del agua en sistemas de riego por aspersión, contribuyendo a la sostenibilidad del recurso hídrico en zonas rurales de Manabí.

Palabras clave: Riego por aspersión, uniformidad de distribución, Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), eficiencia de riego, aspersor, Catch3D, suelo franco-arcilloso, Manabí.

ABSTRACT

There is currently a great need to optimize water use in agriculture, a relevant issue in Manabí due to water scarcity. Therefore, this research analyzed water distribution in a sprinkler irrigation system operating under real conditions in the El Pechiche sector, Portoviejo.

The methodology used a dual experimental approach: radial trials with an isolated sprinkler (ASPE000114 ½") at pressures of 1.95, 0.9, and 0.8 atm, with rain gauges every 0.5 m; and full-field trials with four sprinklers in 7×8 m (original) and 6×7 m (optimized) configurations, with a 1×1 m collector grid. Soil moisture was measured before and after irrigation with a DELTA-T HH2 sensor. The data were processed with Catch3D software to simulate scenarios and calculate the Christiansen Uniformity Coefficient (CUC), Distribution Uniformity (DU), and application efficiency.

The results showed that the sprinkler presents a "donut-shaped" radial distribution pattern. In the original 7×8 m configuration, the CUC was 64.5%, classified as "poor" according to ISO 15886 standard. After simulations, it was determined that the 7×7 m spacing offered the best balance between uniformity and cost, reaching a higher CUC in simulations, although field validation is still pending. Soil moisture analysis demonstrated that the area's clay-loam soil has horizontal redistribution capacity, reducing the standard deviation of moisture from 1.9% to 0.8% in four days.

Finally, a phased technical improvement plan was developed, prioritizing the reconfiguration of the irrigation frame to 7×7 m (low investment), optimization of operating pressure (high investment), and complementary actions such as nighttime irrigation, periodic nozzle cleaning, and systematic monitoring. It is concluded that low irrigation efficiency is a technical problem with a technical solution, and through evaluations and strategic adjustments it is possible to significantly optimize water use in sprinkler irrigation systems, contributing to the sustainability of water resources in rural areas of Manabí.

Keywords: Sprinkler irrigation, distribution uniformity, Christiansen Uniformity Coefficient (CUC), irrigation efficiency, sprinkler, Catch3D, clay-loam soil, Manabí.

CONTENIDO

I.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	1
1.1.	Introducción.....	1
1.2.	Planteamiento del problema.....	2
1.3.	Problema de investigación.....	2
1.4.	Objeto.....	2
1.5.	Campo de acción detallado.....	2
1.6.	Hipótesis.....	2
1.7.	Justificación.....	2
1.8.	Objetivo.....	3
1.9.	Tareas de Investigación.....	3
II.	ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO.....	4
2.1.	Antecedentes.....	4
2.2.	Marco Teórico.....	5
2.2.1.	Características del Riego por Aspersión.....	5
2.2.2.	Clasificación de Sistemas de Riego por Aspersión.....	7
2.2.3.	Componentes principales del sistema.....	9
2.2.4.	Ventajas del Riego por Aspersión.....	9
2.2.5.	Desventajas del Riego por Aspersión.....	10
2.2.6.	Diseño Agronómico e Hidráulico de un Sistema de Riego por Aspersión.....	11
2.2.7.	Eficiencia y Uniformidad del Riego por Aspersión.....	12
2.2.8.	Uniformidad de Distribución del Agua.....	13
2.2.9.	Factores que Afectan la Eficiencia del Riego por Aspersión.....	14
2.2.10.	Metodología de Evaluación de Sistemas de Riego por Aspersión.....	15
2.2.11.	Normativas y Estándares Internacionales.....	15
2.2.12.	Criterios de Eficiencia para la Evaluación.....	16
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.1.	Ubicación del Sitio.....	17
3.2.	Equipos y Materiales.....	17
3.3.	Procedimiento metodológico.....	20
3.3.1.	Elección del área de estudio.....	20
3.3.2.	Caracterización del sistema de riego.....	21
3.3.3.	Preparación del área de ensayo.....	22
3.3.4.	Ejecución del ensayo por el Método de Campo Completo.....	23
3.3.5.	Ejecución del ensayo por el Método Radial (Aspersor Aislado).....	23
3.3.6.	Medición de humedad del suelo.....	24
3.3.7.	Procesamiento y análisis de datos.....	25

3.3.8.	Integración y análisis comparativo.....	25
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
4.1.	Análisis del patrón de distribución del aspersor mediante evaluaciones radiales	26
4.1.1.	Ensayo Método Radial 1	26
4.1.2.	Ensayo Método Radial 2.....	30
4.1.3.	Ensayo radial 3	34
4.1.4.	Simulación de Uniformidad a partir de los Ensayos Radiales	37
4.2.	Análisis de la distribución del agua en la parcela de riego.	41
4.2.1.	Evaluación Campo Completo 7x8m	41
4.2.2.	Evaluación Campo completo 6x7 m	47
4.3.	Análisis de la redistribución del agua en el suelo	52
4.4.	Definición del Plan de mejora para incrementar la uniformidad y eficiencia del riego. 53	
4.4.1.	Acciones Complementarias	54
V.	CONCLUSIONES	55
VI.	RECOMEndaciones	56
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
VIII.	ANEXOS	60
8.1.	Ejecución de ensayos y toma de datos	60
8.2.	Resultados de Simulaciones de pruebas Radiales.....	64
8.2.1.	Ensayo Radial 1	64
8.2.2.	Ensayo Radial 2	66
8.2.3.	Ensayo Radial 3	68

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i>	<i>Valores de CUC obtenidos en las simulaciones del Ensayo radial 1</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2.</i>	<i>Valores de CUC obtenidos en las simulaciones del Ensayo radial 2</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 3.</i>	<i>Valores de CUC obtenidos en las simulaciones del Ensayo radial 3</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4.</i>	<i>Promedio de CUC Simulados en cada ensayo Radial.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 5.</i>	<i>Valores obtenidos del Ensayo de pluviometría para CC 6x7m</i>	<i>48</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Ubicación Geográfica del lugar de estudio, coordenadas en formato DMS.</i>	17
<i>Figura 2: Aspersor utilizado en el ensayo.</i>	18
<i>Figura 3. Distribución de colectores</i>	18
<i>Figura 4. Medidas del colector para ensayos de Pluviometría.</i>	18
<i>Figura 5. Manómetro utilizado en los ensayos.</i>	19
<i>Figura 6. Sensor utilizado para medir la humedad del suelo.</i>	19
<i>Figura 7. Ventana Inicial del programa CATCH3D.</i>	20
<i>Figura 8. Selección de área a trabajar</i>	21
<i>Figura 9. Altura de aspersores.</i>	22
<i>Figura 10. Colocación de pluviómetros para ensayo método radial.</i>	22
<i>Figura 11: Ensayo pluviométrico para campo completo 7 x 8 m</i>	23
<i>Figura 12: Ejecución de ensayo Radial.</i>	24
<i>Figura 13: Medición de Humedad del Suelo</i>	25
<i>Figura 14. Evaluación Método Radial n°1.</i>	27
<i>Figura 15. Resultado de Balance de masas en Radial n°1</i>	27
<i>Figura 16. Resultados Estadísticos de la Distribución del Agua en Radial n°1</i>	28
<i>Figura 17. Distribución de la lámina en función del radio de alcance - Radial 1</i>	29
<i>Figura 18. Representación 3D del patrón de distribución del agua en parcela 7x8 m.</i>	30
<i>Figura 19. Evaluación Método Radial n°2</i>	30
<i>Figura 20: Resultados de Balance de masas en Radial n°2</i>	31
<i>Figura 21. Resultados Estadísticos de la Distribución del Agua en Radial n°2</i>	31
<i>Figura 22. Distribución de lámina en función del radio de alcance - Radial 2</i>	32
<i>Figura 23. Representación 3D del patrón de distribución en parcela 6x7 operando a 0.8 atm (1)</i>	33
<i>Figura 24. Evaluación Método Radial n°3</i>	34
<i>Figura 25. Resultados de Balance de masas en Radial n°3</i>	34
<i>Figura 26. Resultados Estadísticos de la Distribución del Agua en Radial n°3</i>	35
<i>Figura 27. Distribución de la lámina en función del radio de alcance – Radial 3</i>	35
<i>Figura 28. Representación 3D del patrón de distribución en parcela 6x7 operando a 0.8 atm (2)</i>	36
<i>Figura 29. Simulación 8x8 m. del Radial 1</i>	38
<i>Figura 30. Simulación 7x7 m. del Radial 2</i>	39
<i>Figura 31. Simulación 7x7 m. del Radial 3</i>	40

<i>Figura 32. Gráfica representativa de las simulaciones realizadas.</i>	40
<i>Figura 33: Balance de masa Campo Completo 7x8 m</i>	42
<i>Figura 35: Datos estadístico de la configuración 7x8 m real</i>	44
<i>Figura 36: Mapa de distribución de lámina aplicada para configuración 7 × 8</i>	45
<i>Figura 37. Mapa de distribución de lámina aplicada - Simulación Radial 1</i>	45
<i>Figura 38. Mapa de distribución de lámina aplicada - Simulación Radial 2</i>	46
<i>Figura 39. Mapa de distribución de lámina aplicada - Simulación Radial 3</i>	47
<i>Figura 40: Datos estadísticos de la prueba de Campo Completo 6x7m</i>	48
<i>Figura 41. Mapa de distribución de lámina aplicada – Ensayo CC 6x7m.</i>	49
<i>Figura 42. Mapa de distribución de lámina aplicada - Simulación Radial 1</i>	50
<i>Figura 43. Mapa de distribución de lámina aplicada - Simulación Radial 2</i>	51
<i>Figura 44. Mapa de distribución de lámina aplicada - Simulación Radial 3</i>	51
<i>Figura 45: Distribución de la humedad del 18 de junio del 2025</i>	52
<i>Figura 46: Distribución de humedad post 4 días</i>	53
<i>Figura 47. Colocación de pluviómetros para pruebas</i>	60
<i>Figura 48. Campo listo para realizar prueba de radio de alcance</i>	60
<i>Figura 49. Toma de datos obtenidos en pruebas pluviométricas</i>	61
<i>Figura 50. Preparación de área para prueba de campo completo</i>	61
<i>Figura 51. Medición de humedad del suelo</i>	62
<i>Figura 52. Recolección de datos en prueba de campo completo</i>	62
<i>Figura 53. Hoja de datos recolectados tras ensayos</i>	63
<i>Figura 54. Gráfica 3D de simulación 7x8m - Radial 1</i>	64
<i>Figura 55. Gráfica 3D de simulación 7x7m - Radial 1</i>	64
<i>Figura 56. Gráfica 3D de simulación 6x7m - Radial 1</i>	65
<i>Figura 57. Gráfica 3D de simulación 6x6m - Radial 1</i>	65
<i>Figura 58. Gráfica 3D de simulación 8x8m - Radial 2</i>	66
<i>Figura 59. Gráfica 3D de simulación 7x8m - Radial 2</i>	66
<i>Figura 60. Gráfica 3D de simulación 6x7m - Radial 2</i>	67
<i>Figura 61. Gráfica 3D de simulación 6x6m - Radial 2</i>	67
<i>Figura 62. Gráfica 3D de simulación 8x8m - Radial 3</i>	68
<i>Figura 63. Gráfica 3D de simulación 7x8m - Radial 3</i>	68
<i>Figura 64. Gráfica 3D de simulación 6x7m - Radial 3</i>	69
<i>Figura 65. Gráfica 3D de simulación 6x6m - Radial 3</i>	69

I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Introducción

El uso eficiente del agua en el sector agrícola ha tomado un desafío urgente, especialmente en zonas donde la escasez de este recurso hídrico es muy limitada o su distribución está mal diseñada, siendo uno de los objetivos fundamentales de la agricultura sostenible. Bajo esta explicación, los sistemas de riego presurizados, especialmente el riego por aspersor se presenta como una innovación frente a otros métodos de riego, los cuales tienen pérdidas de agua por infiltración, evaporación y escorrentía (FAO, 2015).

El método de riego por aspersión trabaja a través de la aplicación controlada de agua a presión, imitando el efecto de la lluvia en los cultivos. Este sistema favorece una distribución más uniforme del agua, optimizando el riego, la eficiencia en su uso y la facilidad de horarios y cantidad de riegos. También se ajusta a cualquier tipo de terreno, incluyendo irregularidades lo que amplía su uso en distintas zonas agrícolas (Martinez, 2013).

Sin embargo, para que la irrigación con aspersores sea en verdad funcional es importante realizar un diseño técnico, una operación apropiada del sistema y un mantenimiento continuo de sus partes. Factores como la presión operativa, el caudal y el alcance de los aspersores, el distanciamiento entre ellos, la velocidad y la dirección del viento, las características del suelo y las condiciones del agua en el cultivo deben ser meticulosamente evaluados durante la fase de la planificación. La relación entre los factores no solo afecta la eficiencia en el suministro de agua, sino que también influye en las repercusiones ambientales y económicas del sistema.

Desde el ámbito de la ingeniería civil, el uso de este método requiere de ciertos conocimientos en el área de la hidráulica, el comportamiento de fluidos, la agricultura, el estudio de suelo y la administración del medio ambiente.

El ingeniero civil debe no solo realizar cálculos correctos en las conexiones de las tuberías y de los sistemas de bombeo, sino también entender cómo actúa el agua en el suelo y su relación con el desarrollo del cultivo. De igual manera, debe proponer soluciones más viables a posibles problemas que se presenten y que optimicen el recurso hídrico, además de reducir los costos operativos.

El objetivo de esta investigación es analizar la eficiencia en la distribución del agua en sistemas de riego presurizados por aspersión, mediante ensayos técnicos en condiciones reales de funcionamiento. Para ello se prevé el uso de herramientas de simulación, análisis técnicos y estudios de caso con el fin de evaluar la uniformidad de distribución del agua en un sistema de riego por aspersión.

1.2. Planteamiento del problema

¿Cómo se distribuye el agua en un sistema de riego por aspersión en condiciones reales de campo?

1.3. Problema de investigación

La baja eficiencia del uso del agua en sistemas de riego y el desconocimiento de los factores que inciden en su deterioro.

1.4. Objeto

El sistema de riego por aspersión

1.5. Campo de acción detallado

Construcción e Ingeniería Civil

1.6. Hipótesis

Contar con un diseño técnico apropiado a partir del análisis de la distribución del agua en el suelo permite conseguir un aprovechamiento más efectivo del agua en los sistemas de riego por aspersión.

1.7. Justificación

El creciente déficit hídrico que enfrentan muchas regiones del mundo, agravado por la demanda de una mayor productividad agrícola, vuelve imprescindible evaluar e implementar soluciones técnicas que permitan un uso eficiente del agua en la agricultura. Elegir el tipo de sistema de riego más adecuado es una estrategia clave para optimizar el aprovechamiento del agua en el suelo. Los sistemas de riego presurizados representan una alternativa confiable, moderna y eficaz; sin embargo, su eficiencia depende directamente del diseño hidráulico, de la

correcta operación y de la sistematicidad de su mantenimiento, por lo que se requiere de una evaluación rigurosa y técnicamente fundamentada.

Desde el campo de la Ingeniería Civil, esta investigación resulta relevante, ya que integra aspectos hidráulicos, ambientales y sociales. El estudio de diseño, dimensionamiento y operación de sistemas de riego por aspersión permite al profesional aportar soluciones sustentables a los problemas relacionados con la disponibilidad de agua.

Además, esta tesis cobra especial importancia en el contexto nacional y local, especialmente en zonas rurales donde la escasez de agua limita el desarrollo agrícola y afecta la calidad de vida de los productores. Definir los parámetros claves para maximizar la eficiencia del riego representa un aporte significativo tanto para el desarrollo rural como para la formación integral del Ingeniero Civil.

1.8. Objetivo

Analizar la distribución del agua en un sistema de riego por aspersión en condiciones reales de funcionamiento.

1.9. Tareas de Investigación

- Determinar la distribución de la lámina de riego en un sistema de riego por aspersión.
- Analizar la calidad del riego en una parcela mediante parámetros de uniformidad y eficiencia.
- Elaborar Plan de mejora técnica que contribuya a optimizar el uso del agua y aumentar la uniformidad y eficiencia del riego.

II. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

La creciente escasez hídrica ha impulsado la investigación en optimización de sistemas de riego por aspersión, donde la configuración de los emisores y sus parámetros operativos resultan fundamentales para garantizar la eficiencia en la aplicación del agua.

En este contexto, Kostenko et al. (2021), realizaron un estudio experimental para determinar los parámetros operativos de un sistema de riego por aspersor posicional, con el objetivo de mejorar la distribución de agua en zonas agrícolas. En su investigación, describen el diagrama estructural del aspersor diseñado, así como el principio de funcionamiento que permite generar una trayectoria de riego casi rectangular, lo que reduce las zonas de humedad excesiva o insuficiente. Mediante modelación matemática y análisis cinemático, los autores cuantificaron parámetros clave, como la uniformidad en la distribución del agua, y demostraron que su diseño mejoró la calidad del riego al lograr una trayectoria más controlada, reduciendo las áreas de baja humedad en más de un 77% y disminuyendo el consumo de recursos hídricos en un 25%.

Por otra parte, en un estudio reciente se utilizó modelos de *machine learning* para predecir el coeficiente de uniformidad (CU) y la uniformidad de distribución (DU) en aspersores de impacto, usando variables hidráulicas y climatológicas en tres tipos de aspersores (KA-4, FOX y 2520) con dos esquemas de disposición (cuadrada y triangular). Aquí Elhussiny et al. (2023), encontraron que el mejor desempeño predictivo se obtuvo con el modelo híbrido XGB-RF, alcanzando R^2 de 0,929 para CU en el escenario óptimo, lo que indica una predicción muy precisa. Además, concluyeron que la altura del aspersor tuvo el menor impacto sobre los modelos de predicción, en comparación con la presión o el caudal. Este estudio es particularmente relevante para la presente investigación al demostrar la viabilidad de incorporar componentes predictivos en la evaluación de eficiencia de sistemas de aspersión.

En cuanto a la configuración espacial del sistema, Andrade et al. (2022), analizaron la uniformidad del agua en un sistema de riego por aspersión instalado en un campo de fútbol, usando aspersores Falcon 6504 operando a 320 kPa. A través de ensayos con diferentes distancias entre aspersores, calcularon múltiples coeficientes de uniformidad donde en los espaciamientos más grandes se generó una caída en la uniformidad de distribución del agua,

contrario a los aspersores con espaciamentos menores donde su uniformidad resultó más alta. Finalmente, recomendaron que el espaciamento óptimo de aspersores sería de 12 a 15 m, desde un punto de vista técnico y económico para este sistema específico.

Paralelamente, un estudio en *Agroengineering Journal* (Hussain, Liu, Chauhdary, Zhao, & Wang, 2025), cuantificó el radio mojado, el Coeficiente de Uniformidad (CU) y el Coeficiente de Distribución (DU) de diferentes boquillas, evaluando el efecto de la presión operativa y la altura del aspersor (SMH). Los resultados confirmaron que incrementos en la presión y una altura del aspersor dentro de un rango óptimo mejoran significativamente la uniformidad del riego, alcanzándose valores de CU de aproximadamente 89% con una boquilla específica. Este hallazgo constituye un antecedente crucial para la presente investigación, ya que valida empíricamente la hipótesis de que la optimización conjunta de los parámetros hidráulicos (presión) y la configuración geométrica del sistema (altura y tipo de boquilla) es fundamental para maximizar el rendimiento hidráulico del sistema de riego.

Por último, Qureshi et al. (2023), analizaron un aspersor de impacto operando a baja presión (150-250 kPa) y desarrollaron una versión con aeración (aspersor con chorro de aire) para mejorar la uniformidad. Sus resultados mostraron que el aspersor con aeración (AIS) tuvo un CU entre un 3 % y 7 % mayor que el aspersor normal, especialmente a baja presión, y además el modelo simulado concordó adecuadamente con los datos experimentales. Esta investigación sugiere que modificaciones estructurales representan una estrategia promisoría para mantener una adecuada uniformidad bajo condiciones de presión limitada.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Características del Riego por Aspersión

Los sistemas de riego por aspersión se fundamentan en la aplicación de agua a presión a través de una red de tuberías que culminan en emisores o aspersores distribuidos estratégicamente sobre el área de cultivo. El agua es pulverizada formando gotas de diversos tamaños que caen sobre el suelo y las plantas, similar a una precipitación natural (Espinosa, 2011).

Este tipo de sistemas constituyen uno de los métodos de riego presurizados más importantes en la agricultura moderna, permitiendo una distribución más uniforme del agua en

comparación con otros métodos tradicionales de riego superficial (Peralta & Simpfendörfer, 2001).

Además, el riego por aspersión se caracteriza por ser adaptable a diferentes tipos de cultivos. Es eficaz en terrenos irregulares donde otros métodos de riego presentan dificultades. Su distribución simulando la lluvia resulta en una aplicación precisa y uniforme que optimiza el consumo hídrico del cultivo y minimiza la pérdida por escorrentía y erosión del suelo.

Características Técnicas y Operativas:

- Distribución del agua: El agua se pulveriza en gotas de tamaño controlado que caen sobre la superficie del cultivo.
- Presión de trabajo: Opera en un rango de 150 a 500 kPa, dependiendo del tipo de aspersor y boquilla.
- Componentes del sistema: Incluye tuberías principales y laterales, aspersores, bombas, válvulas y dispositivos de control.
- Uniformidad de aplicación: Los sistemas bien diseñados alcanzan coeficientes de uniformidad (CU) superiores al 85%.
- Automatización: Permite la programación de tiempos y secuencias de riego mediante controladores automáticos.

Características de Diseño y Configuración:

- Espaciamiento: Los aspersores se disponen en patrones cuadrados, triangulares o rectangulares, con distancias típicas de 12×12 m a 18×18 m.
- Cobertura: Radio de alcance variable entre 5 y 30 metros según el modelo y presión.
- Portabilidad: Existen sistemas fijos, semifijos y móviles (como los de pivote central o avance frontal).

Características de Eficiencia:

- Eficiencia de aplicación: Varía entre 75% y 85% en condiciones óptimas.
- Pérdidas de agua: Incluyen evaporación directa (2-10%) y deriva por viento (5-15%).
- Adaptabilidad: Eficaz en suelos con texturas variables y pendientes hasta 15%.

Características Agronómicas:

- Aplicaciones versátiles: Adecuado para la mayoría de los cultivos en hilera, praderas y cultivos extensivos.
- Efecto microclimático: Puede reducir la temperatura ambiental durante episodios de calor.
- Compatibilidad: Permite la aplicación simultánea de agua y fertilizantes (fertirrigación).

Características Económicas:

- Inversión inicial: Moderada a alta comparada con riego por superficie, pero menor que el riego localizado.
- Costos operativos: Incluyen consumo energético (para bombeo) y mantenimiento periódico.
- Vida útil: Entre 10 y 15 años con mantenimiento adecuado.

2.2.2. Clasificación de Sistemas de Riego por Aspersión

Según Keller y Bliesner (2000), los sistemas de riego por aspersión pueden clasificarse según diferentes criterios técnicos y operativos. A continuación, se presenta una clasificación integral basada en la literatura especializada:

Según su Movilidad y Portabilidad:

- *Sistemas Estáticos o Fijos*, las tuberías principales y laterales permanecen enterradas en superficie, tiene una alta inversión inicial pero mínimo requerimiento de mano de obra y se presentan ideales para cultivos permanentes o de alto valor.
- *Sistemas Semifijo*, la tubería principal es fija mientras los laterales son móviles y permite rotación de laterales entre diferentes sectores.
- *Sistemas Móviles o Portátiles*, todos los componentes pueden moverse manual o mecánicamente, tienen un menor costo inicial pero mayor requerimiento de mano de obra e incluyen sistemas de avance frontal, lateral y de giro continuo.

Según su Mecanismo de Desplazamiento:

- *Sistemas de Avance Frontal*, su línea de aspersores se mueve como una unidad frontal, es adecuado para parcelas rectangulares grandes y requiere menor mano de obra que los sistemas portátiles
- *Sistemas de Pivote Central*, giran alrededor de un punto fijo central, forman círculos de riego característicos y son altamente automatizados y eficientes
- *Sistemas de Avance Lateral*, similar al pivote, pero se mueve linealmente, es apropiado para parcelas rectangulares extensas.

Según el Tipo de Aspersor:

- *Aspersores de Impacto*, rota mediante mecanismo de brazo de impacto, son robustos y adecuados para aguas con sedimentos y tienen mayor alcance, pero menor uniformidad en condiciones ventosas
- *Aspersores Turbina*, rota mediante engranajes internos, tienen mayor uniformidad de distribución y son más susceptibles a obstrucciones
- *Aspersores de Difusor Fijo*, sin partes móviles, distribución fija del agua, poseen un bajo costo, mantenimiento y menor uniformidad en aplicaciones extensivas

Según la Presión de Operación:

- *Alta Presión (>400 kPa)*, mayor alcance, pero menor eficiencia energética, mayor susceptibilidad a pérdidas por viento y evaporación
- *Media Presión (200-400 kPa)*, balance entre cobertura y eficiencia y son más utilizados en agricultura comercial
- *Baja Presión (<200 kPa)*, poseen mayor eficiencia energética, requieren aspersores especializados y menor afectación por viento.

Según el Grado de Automatización:

- *Sistemas Manuales*, requieren intervención humana para todas las operaciones, con mayor flexibilidad, pero mayor demanda de mano de obra
- *Sistemas Semiautomáticos*, su programación básica de secuencias de riego y control sectorial automatizado
- *Sistemas Automatizados*, control completo mediante programadores y sensores, presentan posibilidad de integración con estaciones meteorológicas y mayor precisión en la aplicación del agua

2.2.3. Componentes principales del sistema

En los sistemas de riego por aspersión se encuentran los siguientes elementos fundamentales según Martínez (1991) :

Unidad de Bombeo: encargada de impulsar el agua a través del sistema, está compuesta por una bomba hidráulica, tubería de aspiración, válvulas de succión y accesorios de descarga.

Red de Tuberías: incluye la tubería principal que conduce el agua desde la fuente hasta el sistema de distribución y, tuberías secundarias y laterales que distribuyen el agua hasta los aspersores. Pueden ser de PVC, polietileno, aluminio o acero.

Aspersores: encargados de pulverizar el agua en gotas. Se clasifican en aspersores de impacto, rotativos, y microaspersores, cada uno con características específicas de caudal, alcance y tamaño de gota.

Válvulas y Accesorios: incluyen válvulas de control, aire, seguridad, y diversos accesorios para el correcto funcionamiento hidráulico del sistema.

Manómetros: responsables de medir la presión del agua dentro del sistema.

Filtros: Ayudan a eliminar sedimentos suspendidos en el agua para evitar obstrucciones en las tuberías y aspersores.

2.2.4. Ventajas del Riego por Aspersión

- Alta Eficiencia en la Aplicación del Agua: Los sistemas modernos de aspersión, especialmente aquellos de baja presión y alto uniformidad, permiten una distribución precisa del agua, minimizando las pérdidas por percolación profunda y escorrentía. Esto conduce a un uso más eficiente del recurso hídrico en comparación con métodos de riego por superficie (Pereira, Cordery, & Iacovides, 2012).
- Adaptabilidad a Terrenos Irregulares: A diferencia del riego por gravedad, el riego por aspersión es viable en terrenos con topografía accidentada o con pendientes pronunciadas, donde la nivelación del terreno sería inviable o demasiado costosa (Keller & Bliesner, 2000).
- Adecuado para Diferentes Tipos de Suelo: Es eficaz en suelos con texturas arenosas de alta permeabilidad, donde el riego por superficie es ineficiente, así

como en suelos arcillosos donde se requiere una aplicación lenta para evitar la escorrentía.

- Compatibilidad con la Fertirrigación: Permite la aplicación uniforme de fertilizantes solubles a través del sistema de riego, lo que incrementa la eficiencia en el uso de nutrientes y reduce los costos de mano de obra (Pereira, Cordery, & Iacovides, 2012).

2.2.5. Desventajas del Riego por Aspersión

- Alto Costo de Inversión y Mantenimiento: La adquisición e instalación del equipo (bombas, tuberías, aspersores) implica una inversión inicial elevada en comparación con los sistemas de riego por superficie. Además, requiere un mantenimiento periódico para prevenir obstrucciones y fallos mecánicos (Kay, 2013).
- Pérdidas Potenciales por Evaporación y Deriva: Una fracción del agua aplicada se puede perder por evaporación directa desde las gotas en el aire o por deriva del viento, especialmente en condiciones de alta temperatura, baja humedad y días ventosos. Esta eficiencia de aplicación puede ser menor que en sistemas localizados como el goteo (Allen et al., 1998).
- Mayor Demanda Energética: La necesidad de generar presión suficiente para el funcionamiento de los aspersores requiere un consumo constante de energía, generalmente proveniente de motores eléctricos o de combustión, incrementando los costos operativos (Plaván & Mateos, 2006).
- Riesgo de Desarrollo de Enfermedades Fúngicas: La mojadura constante del follaje de los cultivos puede crear un microclima húmedo favorable para el desarrollo y proliferación de enfermedades como mildius, oídios y otras relacionadas con hongos (Palti, 1981).
- Posible Degradación de la Estructura del Suelo: El impacto de las gotas de agua sobre la superficie del suelo, especialmente en suelos desnudos y de textura fina, puede causar sellado y compactación de la capa superficial, reduciendo la infiltración y aumentando la escorrentía (Thompson & James, 1985).

2.2.6. Diseño Agronómico e Hidráulico de un Sistema de Riego por Aspersión

El diseño completo de un sistema de riego por aspersión es un proceso que tiene como objetivo distribuir el agua de manera uniforme y eficiente para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos. Este diseño mezcla el conocimiento agronómico, que considera los requerimientos y comportamiento del cultivo, con respecto a la ingeniería hidráulica, esta se encarga de seleccionar y dimensionar de manera correcta los componentes para optimizar el sistema. El diseño de un sistema de riego por aspersión comprende dos componentes principales:

Diseño Agronómico, incluye la determinación de evapotranspiración, lámina de reposición, velocidad de infiltración básica del suelo, frecuencia de riego, superficie mínima de riego diario, selección del modelo de aspersor, disposición de aspersores en campo, número de laterales necesarios y caudales requeridos. Se deben considerar los siguientes conceptos a partir de considerar al suelo como reservorio de agua, almacenando parte de la precipitación y del riego para posteriormente entregarla al cultivo. Los parámetros clave incluyen:

- Capacidad de Campo: Contenido máximo de agua que el suelo puede retener después del drenaje por gravedad.
- Punto de Marchitez Permanente: Contenido de humedad en el cual las plantas no pueden extraer más agua del suelo.
- Agua Disponible: Diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.
- Umbral de Riego: Nivel de agotamiento del agua del suelo a partir del cual se debe iniciar un nuevo riego para evitar estrés hídrico en el cultivo.

Diseño Hidráulico, comprende el dimensionamiento de tuberías principales y laterales, cálculo de pérdidas de carga, determinación de sectores y bloques de riego, selección de válvulas y accesorios, y selección de la unidad de bombeo.

Este diseño comienza con la búsqueda del caudal total requerido, que depende de la demanda hídrica del cultivo y del terreno a utilizar. Después, se realizan los cálculos de las pérdidas de cargas máximas del sistema para mantener la presión adecuada en cada aspersor. Estas pérdidas dependen de la longitud de la tubería, el diámetro y el material. Los parámetros claves incluyen:

- La selección de los diámetros de las tuberías laterales, principales y secundarias para minimizar las pérdidas por fricción sin sobredimensionamiento que conlleva a más gastos económicos. (Aguirre, 2020)
- Cálculo y selección de bomba que ofrezca el caudal y la presión requerida, considerando la altura total del sistema y la pérdida de carga estimada. (Joselyn, 2021)
- Diseño de la red hidráulica que facilite la distribución del flujo, incluyendo válvulas de control, manómetros y filtros. (Pino Puebla, 2020)
- Comprobación de la presión y del caudal para confirmar que cada aspersor opere en las condiciones esperadas, con uniformidad en la distribución del agua. (Cárdenas, 2019)

2.2.7. Eficiencia y Uniformidad del Riego por Aspersión.

La eficiencia de aplicación del agua es un parámetro fundamental que cuantifica la cantidad de agua aplicada que es efectivamente utilizada por el cultivo. Este parámetro se subdivide en varios componentes:

Eficiencia de Aplicación (Ea)

Indica la cantidad de agua incorporada al suelo hasta la profundidad de estudio en relación con la cantidad total aplicada por el sistema de riego. La diferencia entre estas cantidades representa el volumen perdido por percolación o evaporación.

Eficiencia de Almacenamiento (Es)

Representa la relación entre el volumen de agua almacenado y el requerido para una determinada profundidad del suelo. La diferencia entre estos volúmenes indica el déficit de agua en el suelo.

Pérdidas por Percolación (Pp)

Agua que se infiltra por debajo de la zona radicular y no está disponible para el cultivo.

Pérdidas por Evaporación y Arrastre (PEA)

Durante el riego por aspersión, una parte significativa del agua puede perderse por evaporación y arrastre por el viento. Estas pérdidas incluyen:

- Evaporación de las gotas durante su trayectoria hacia el suelo
- Evaporación del agua interceptada por el follaje

- Evaporación desde la superficie del suelo
- Agua arrastrada fuera de la zona de cultivo por el viento

Según diversos estudios, las PEA pueden variar entre 7.5% para microaspersión hasta 15% o más en condiciones adversas de viento y temperatura. Valores superiores al 15% se consideran inaceptables para un riego eficiente.

Las pérdidas por evaporación dependen principalmente de la humedad relativa, temperatura del aire y del agua, velocidad del viento, altura de los emisores, presión de funcionamiento y diámetro de las gotas.

Déficit de Agua (D)

Cantidad de agua faltante para satisfacer completamente las necesidades del cultivo.

2.2.8. Uniformidad de Distribución del Agua

La uniformidad de distribución es un indicador clave del desempeño del sistema que mide la homogeneidad con la que el agua se distribuye sobre el área regada. Los principales coeficientes utilizados para su evaluación son:

Coefficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC)

Desarrollado por Christiansen en 1942, es el método más ampliamente utilizado para evaluar la uniformidad de riego por aspersión. Este coeficiente varía de 0 a 100%, donde valores superiores a 80% se consideran aceptables, y superiores a 90% se califican como excelentes. Su fórmula es:

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum |I_i - I_m|}{n * I_m} \right) * 100$$

Donde,

- I_i , es la intensidad medida en cada pluviómetro
- I_m es la intensidad media de todas las observaciones
- n es el número total de observaciones.

Uniformidad de Distribución (UD)

Relación entre la lámina media del 25% de los valores más bajos y la lámina media total. Valores superiores a 80% se consideran adecuados según Keller y Bliesner (2000).

$$UD = \left(\frac{L_{25\% inferior}}{L_{Total}} \right) * 100$$

Donde,

- $L_{25\% inferior}$: Lámina promedio del 25% de los puntos con menores valores de ampliación
- L_{Total} : Lámina promedio total
- UD : Uniformidad de distribución expresada en (%)

2.2.9. Factores que Afectan la Eficiencia del Riego por Aspersión

La eficiencia y uniformidad del riego por aspersión según Allen et al. (1998), están influenciadas por múltiples factores, entre ellos, tenemos:

Factores Hidráulicos

- Presión de Trabajo: Los aspersores funcionan dentro de un rango óptimo de presión. A mayor presión dentro del rango recomendado, mejor distribución del agua, aunque con mayor consumo energético.
- Caudal del Aspersor: Debe ser consistente y acorde al diseño para garantizar la uniformidad.
- Espaciamiento entre Aspersores: El diseño del marco de riego (distancia entre aspersores y entre líneas laterales) es fundamental. Espaciamientos excesivos reducen la uniformidad por falta de solapamiento, mientras que espaciamientos muy reducidos generan altas pérdidas por percolación.

Factores Climáticos

- Velocidad del Viento: Es uno de los factores más condicionantes del riego por aspersión, provocando deformación en el patrón de distribución del agua y pérdidas por deriva. Velocidades entre 1-2.5 m/s hacen poco recomendable el riego por aspersión, mientras que velocidades superiores a 2.5 m/s no son recomendables.
- Temperatura y Humedad Relativa: Afectan directamente las pérdidas por evaporación durante el vuelo de las gotas.

Factores del Sistema

- Tipo y Características del Aspersor: El modelo, tamaño de boquilla, ángulo de descarga y altura del aspersor sobre el suelo influyen en el tamaño de gota y patrón de distribución.
- Tamaño de Gota: Gotas demasiado pequeñas son susceptibles a pérdidas por evaporación y deriva, mientras que gotas muy grandes pueden causar erosión del suelo y compactación.

2.2.10. Metodología de Evaluación de Sistemas de Riego por Aspersión

La evaluación de campo de los sistemas de riego permite conocer su funcionamiento real y establecer criterios de manejo que mejoren la eficiencia. El procedimiento general se basa en un conjunto de normas ISO 15886 (2021), en función de la técnica de aspersión empleada e incluye los siguientes aspectos generales:

1. Selección de la zona representativa: Área que incluya múltiples aspersores en funcionamiento simultáneo
2. Instalación de colectores o pluviómetros: Distribuidos en una malla regular
3. Registro de datos: Volúmenes colectados, presiones en aspersores, caudales, condiciones climáticas (viento, temperatura, humedad)
4. Duración del ensayo: Mínimo 1 hora de funcionamiento continuo
5. Cálculo de indicadores: CUC, UD, eficiencia de aplicación, área adecuadamente regada, área regada excesivamente y área regada insuficientemente.

2.2.11. Normativas y Estándares Internacionales

Existen diversas normas que regulan el diseño, operación y evaluación de sistemas de riego por aspersión:

- ISO 15886 (Serie): Conjunto de normas internacionales desarrolladas por la Organización Internacional de Normalización (ISO) que especifican los métodos de ensayo y caracterización de aspersores de riego agrícola (ISO, 2021). Incluyen requisitos para:
 - a) Determinación del caudal y radio de alcance.
 - b) Evaluación de la distribución del agua (uniformidad radial).
 - c) Características de materiales y durabilidad.

d) Condiciones de instalación y operación.

Esta normativa proporciona el marco metodológico de referencia para la evaluación objetiva de sistemas de riego por aspersión, siendo ampliamente utilizadas en investigación, certificación de equipos y diseño agronómico.

2.2.12. Criterios de Eficiencia para la Evaluación

La evaluación técnica de los sistemas de riego por aspersión requiere del análisis de indicadores de desempeño normalizados, los cuales permiten cuantificar su eficiencia hidráulica y operativa. Según la literatura especializada y normativa ISO 15886, los criterios de referencia para la clasificación de la calidad del riego se establecen de la siguiente manera:

- a) Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC):
- >90% (Excelente): Distribución muy uniforme, óptima para cultivos sensibles
 - 80–90% (Bueno): Adecuado para la mayoría de cultivos comerciales
 - 70–80% (Aceptable): Aplicable en cultivos tolerantes a variaciones moderadas
 - <70% (Pobre): Requiere mejora inmediata del diseño o manejo
- b) Uniformidad de Distribución (UD):
- >80% (Adecuada): Solapamiento y espaciamiento apropiados
 - <80% (Inadecuada): Presencia de zonas de subaplicación significativa
- c) Eficiencia de Aplicación (Ea):
- >80% (Eficiente): Pérdidas mínimas por escorrentía, percolación profunda o deriva
- d) Pérdidas por Evaporación y Arrastre (E&D):
- <15% (Aceptable): Condiciones climáticas y de operación favorables

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del Sitio

Los ensayos se realizaron en la provincia de Manabí, cantón Portoviejo, parroquia Río Chico, sector El Pechiche (**Figura 1**).

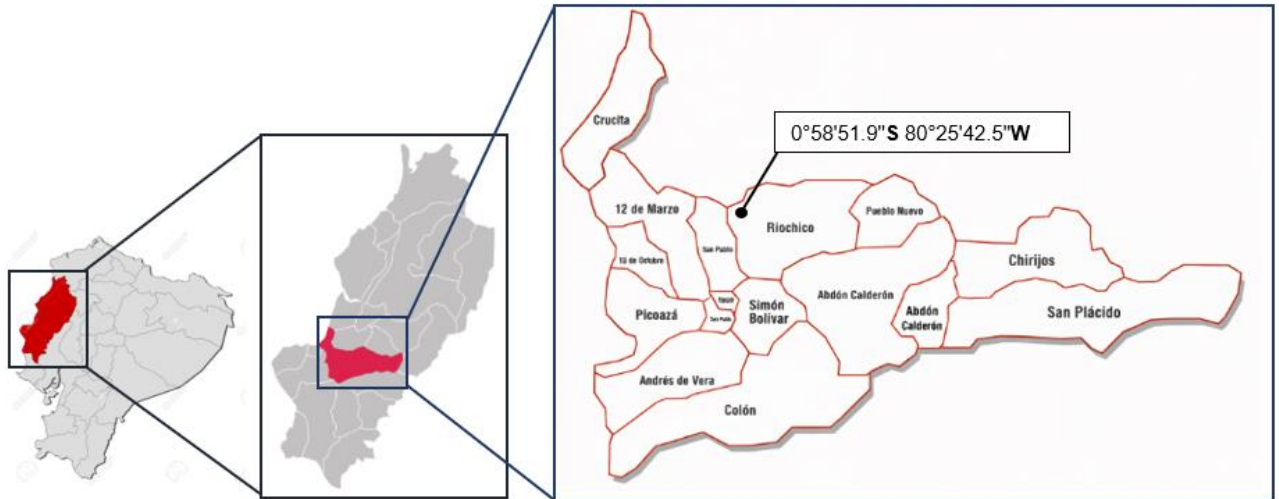


Figura 1. Ubicación Geográfica del lugar de estudio, coordenadas en formato DMS.

3.2. Equipos y Materiales

El trabajo se llevó a cabo con materiales y equipos accesibles para el rubro agrícola y la investigación en campo en Río Chico.

Se evaluó un sistema de riego para pasto de jardín equipado con aspersores modelo ASPE000114 de ½” que permitieron evaluar el comportamiento de riego tanto en conjunto como de manera independiente (**Figura 2**).



Figura 2: Aspersor utilizado en el ensayo.

Para medir la pluviometría se utilizaron pequeños recipientes de plástico como colectores en cada punto, como se muestra en la **Figura 3**. Cuyas características son basadas en la Norma ISO 15886-3, con una altura de 17 cm y diámetro de 12.4 cm, dando así un área de entrada de 0.01207 m^2 (**Figura 4**).



Figura 3. Distribución de colectores



Figura 4. Medidas del colector para ensayos de Pluviometría.

Además, se logró obtener la presión de trabajo mediante manómetros, y así poder obtener el caudal de operación (**Figura 5**).



Figura 5. Manómetro utilizado en los ensayos.

Por último, se determinó la humedad en el suelo con una sonda DELTA-T HH2, para captar los cambios antes y después de cada aplicación de riego (**Figura 6**).



Figura 6. Sensor utilizado para medir la humedad del suelo.

La recopilación y procesamiento de resultados fue apoyado por el software Catch 3D creado por Richard G. Allen en 1995 en la Universidad Estatal de Utah (**Figura 7**), cuya función es analizar estadísticamente los datos de los colectores de agua de los aspersores para sistemas de riego agrícola y simular parámetros de uniformidad de riego a diferentes espaciamientos entre aspersores y laterales.



Figura 7. Ventana Inicial del programa CATCH3D.

Se complementó el trabajo con herramientas básicas de campo, como medidores de presión y caudal, y materiales para delimitar y señalar las zonas estudiadas (Montero, 2020).

3.3. Procedimiento metodológico

3.3.1. Elección del área de estudio

Se eligió una parcela agrícola ubicada en la zona de Rio Chico, provincia de Manabí, una localidad rural caracterizada por actividades agrícola, en este caso, cultivo de césped con fines comerciales. En esta parcela se encuentra instalada un sistema de riego por aspersión de manera artesanal en condiciones reales de operación.

Posteriormente, se seleccionó el área a trabajar (**Figura 8**), determinando los puntos donde se realizarían los ensayos, tomando en cuenta la topografía del lugar y la disposición de los aspersores. Las evaluaciones hidráulicas en condiciones de campo se realizaron según lo establecido en la norma ISO 15886 (2021).



Figura 8. Selección de área a trabajar

3.3.2. Caracterización del sistema de riego

Antes de realizar los ensayos, se realizó una inspección técnica del sistema de riego con el objetivo de registrar sus principales características. En esta inspección se pudo identificar el tipo de aspersor, el tipo de boquilla, el diámetro, la altura del aspersor, los espaciamientos laterales y entre emisores, así mismo el tipo de tubería utilizada.

A partir de esto se realizaron pequeñas modificaciones para que el sistema tenga características uniformes que ayudarían a un mejor análisis, como la ubicación de todos los aspersores a una misma medida, en este caso a una altura de 0,7 m desde el suelo como se muestra en la **Figura 9**.



Figura 9. Altura de aspersores.

3.3.3. Preparación del área de ensayo

Una vez definido el sistema, se procedió a preparar el área para poder realizar el ensayo pluviométrico. Los colectores fueron ubicados a nivel del suelo cada 1 m entre colector para el ensayo por el método de campo completo y a 0.5 m para el método radial (**Figura 10**). Esta disposición permitió cubrir de mejor manera el área de influencia de los aspersores y analizar los patrones de riego.



Figura 10. Colocación de pluviómetros para ensayo método radial.

3.3.4. *Ejecución del ensayo por el Método de Campo Completo*

Para simular el funcionamiento real de un sistema de riego grupal, se instalaron cuatro aspersores en una disposición de matriz de 8 filas por 9 columnas como se observa en la **Figura 11**. En cada punto, se colocó un recipiente de plástico como colector pluviométrico.



Figura 11: Ensayo pluviométrico para campo completo 7 x 8 m

Este arreglo permitió obtener datos detallados sobre la cantidad de agua depositada y su variación espacial cuando los aspersores trabajan en conjunto, haciendo posible construir mapas de distribución y estimar el coeficiente de uniformidad.

Durante cada sesión de riego, se registraron variables como la presión en la línea y las condiciones ambientales, repitiendo los ensayos para lograr resultados representativos. Adicionalmente, sensores de humedad permitieron analizar el impacto de cada ciclo en el suelo, orientando el manejo eficiente del agua.

Todos los datos obtenidos se procesaron en el software Catch 3D, que facilitó la simulación y ajuste de parámetros para lograr la máxima uniformidad posible en el riego.

3.3.5. *Ejecución del ensayo por el Método Radial (Aspersor Aislado)*

El segundo enfoque se centró en el método radial, utilizado para determinar el patrón de distribución del aspersor cuando opera solo. Para ello, se instalaron cuatro radios de colectores en línea, a partir del aspersor hasta el máximo alcance del aspersor espaciados a 0.50 m (**Figura 12**). La duración de la prueba fue de 1 hora y posterior a ello se recolectó el agua depositada en cada colector.



Figura 12: Ejecución de ensayo Radial.

La información recopilada permitió construir la curva radial (Patrón de Distribución), que describe cómo varía la cantidad de agua desde el centro hacia la periferia. Este análisis es clave para entender cómo se distribuye el agua de cada aspersor y a partir de ello ajustar los espaciamientos entre aspersores y laterales que generen mayor uniformidad. La uniformidad obtenida en el ensayo radial es fundamental para asegurar que cada punto del campo reciba la cantidad adecuada de agua, sin excesos ni déficits.

Estas evaluaciones permiten conocer cómo se distribuye el agua de manera radial, identificando:

- Lámina aplicada.
- Variaciones según aumenta la distancia al aspersor.
- Confiabilidad de los resultados.

Se realizaron tres evaluaciones radiales independientes, en condiciones operativas similares. El motivo de ejecutar más de una evaluación es permitir analizar la estabilidad del patrón de distribución, identificar variaciones en la aplicación de agua y presión del trabajo.

Todos los valores obtenidos en campo fueron procesados en el programa “Catch 3D” para generar mapas y la distribución radial. Estos datos constituyen la base para el análisis del comportamiento hidráulico del aspersor y su desempeño en uniformidad.

3.3.6. Medición de humedad del suelo

Se realizaron mediciones de humedad del suelo después del primer ensayo pluviométrico con el sensor de humedad DELTA-T HH2 (**Figura 13**). Estas mediciones

permitieron conocer si la lámina aplicada era la ideal para satisfacer el cultivo y sus requerimientos hídricos. Esta información ayudó a realizar el análisis de la eficiencia del agua y a identificar un posible exceso y déficit de riego.



Figura 13: Medición de Humedad del Suelo

3.3.7. Procesamiento y análisis de datos

La recopilación y procesamiento de resultados fue apoyado por el software Catch 3D, cuya función es analizar estadísticamente los datos de los colectores de agua de los aspersores para sistemas de riego agrícola, y así determinar el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), la Uniformidad de Distribución (UD) y la eficiencia de aplicación del riego.

De igual manera, el software ayuda con la generación de mapas de distribución del agua y la simulación de diferentes escenarios de operación, variando parámetros como el espaciamiento entre aspersores y la presión de trabajo.

3.3.8. Integración y análisis comparativo

El proceso metodológico combinó ambos tipos de ensayos para lograr una visión integral: el ensayo matricial aportó datos sobre la interacción y superposición de aspersores, mientras que el método radial detalló el desempeño individual del aspersor. Los resultados se analizan con herramientas informáticas y métodos estadísticos, buscando siempre ajustar el sistema para maximizar la eficiencia y reducir la pérdida de agua por escurrimiento o evaporación.

Este enfoque iterativo y dual permitió proponer mejoras prácticas en la configuración del sistema de riego, contribuyendo a la gestión sustentable del recurso hídrico y al desarrollo técnico en la región.

Cada ensayo se realizó repitiendo las sesiones de riego, para registrar variaciones y buscar una tendencia confiable. Las mediciones de humedad ayudaron a entender cómo respondía el suelo a cada intervención. Todo ese conjunto de datos fue procesado en Catch 3D, probando diferentes configuraciones y corrigiendo parámetros hasta lograr un nivel de uniformidad que cumple con los estándares de eficiencia.

Finalmente, se evaluó el desempeño del sistema y se implementaron ajustes en función de los resultados, con la intención de establecer las condiciones de operación óptimas para generar la máxima uniformidad en la distribución del agua.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis del patrón de distribución del aspersor mediante evaluaciones radiales

El patrón de distribución del aspersor se determinó mediante evaluaciones radiales, utilizando pluviómetros ubicados cada 0.5 m desde el punto de emisión. Cada ensayo se realizó con un tiempo de operación constante de 60 minutos, bajo condiciones controladas de presión y sin viento.

4.1.1. Ensayo Método Radial 1

En la primera evaluación radial (**Figura 14**), se utilizó el aspersor operando a una presión de 1.95 atm, el caudal de descarga fue de 0.22 L/s, y las mediciones se efectuaron bajo condiciones de campo, lo que indica que las variaciones de la distribución del agua se deben al comportamiento hidráulico del aspersor.



Figura 14. Evaluación Método Radial n°1.

Balance de Masa y Eficiencia de Captación

El programa CATCH3D al ingresar los datos obtenidos en los pluviómetros arrojó los siguientes resultados de Balance de masa (Figura 15).

MASS BALANCE SUMMARY OF ORIGINAL DATA	
Catch can volume =	0.494 cubic meters
Discharge volume =	0.803 cubic meters
Catch Efficiency =	61.5 percent
Catch measurements are in milliliters	
Catch Can Area:	12076 sq. mm
Test duration:	60 min.
Discharge:	0.22 l/s (3.5 gpm)
Wind Speed:	0.00 m/s
Direction:	0 deg from N
Grid Spacing:	0.50 m

Figura 15. Resultado de Balance de masas en Radial n°1

Bajo condiciones controladas sin viento y con un espaciamiento de malla de 0.50 m, el sistema logró captar 0.494 m^3 de 0.803 m^3 de volumen de agua regada, lo que supone una eficiencia del 61.5%. Esto indica que la mayor parte del fluido descargado fue interceptado por el recipiente captador, con una pérdida aproximada del 38.5% atribuible posiblemente a factores como salpicaduras, evaporación o distribución espacial del flujo.

Uniformidad de Aplicación

El programa también realizó un análisis estadístico de los datos de captación para evaluar la uniformidad en la distribución del fluido. Los resultados se presentan en la **Figura 16** a continuación.

STATISTICS for ORIGINAL DATA			
Average Net Application	18.41 ml	Test duration:	60 min.
Average Deviation from Mean	14.93 ml	Discharge:	0.22 l/s
Standard Deviation	17.53 ml		
Skew	0.74		
Kurtosis	2.24		
Average Net Application	1.5 mm/hr	(0.06 in/hr)	
Average Deviation from Mean	1.2 mm/hr	(0.05 in/hr)	
Average Gross Application	2.5 mm	(0.10 in)	
Average Net Application	1.5 mm	(0.06 in)	
Average Depth Highest 10%	4.3 mm	(0.17 in)	
Average Depth Lowest 10%	0.0 mm	(0.00 in)	
Average Depth Low Quarter	0.0 mm	(0.00 in)	
Average Depth Low Half	0.4 mm	(0.01 in)	
App. Eff. Low Quarter (AELQ)	1.2 %		
App. Eff. Low Half (AELH)	14.5 %		
Distribution Uniformity	1.9		
Coefficient of Uniformity (CU):			
CU from Christiansen	18.9	CU from Low Half	23.5
CU from Std. Dev.	24.0	CU from Distr. Unif.	38.2
CU for alternate offsets	43.5		
Ave. vol./sprinkler spacing	0.49 cu.m	(17.4 cu.ft)	

Figura 16. Resultados Estadísticos de la Distribución del Agua en Radial n°1

En la **Figura 17** se presenta la distribución de la lámina aplicada en función del radio de alcance del ensayo radial 1. Se observa que la lámina no se distribuye de manera uniforme, registrando valores bajos en las zonas cercas del aspersor y aumentando progresivamente hacia la zona media de alcance.

El valor máximo de alcance se encuentra aproximadamente entre 7 a 7.5 m, lo que indica una mayor concentración de agua en esta zona, debiéndose a las características de la boquilla del aspersor y del chorro de agua.



Figura 17. Distribución de la lámina en función del radio de alcance - Radial 1

Según los datos mostrados en la figura anterior y con el refuerzo de la **Figura 18**, se puede identificar el patrón de distribución del agua generado cuando el emisor con una presión de 1.95 atm y un espaciamiento entre aspersores de 7x8 opera de manera aislada. En este caso, el aspersor evidencia una configuración tipo rosquilla, caracterizado por una baja lámina de agua en la zona central y una mayor concentración de aplicación en un anillo intermedio, comportamiento que es típico en aspersores de impacto operando de forma aislada.

Al considerar el solapamiento entre aspersores, este tipo de patrón de distribución puede contribuir a mejorar la uniformidad, siempre que el espaciamiento entre emisores sea adecuadamente seleccionado, de manera que las zonas de mayor aplicación de un aspersor compensen las zonas de menor aplicación de los aspersores adyacentes.

No obstante, un espaciamiento excesivo puede provocar déficits hídricos en las áreas centrales, mientras que un espaciamiento reducido puede generar sobre aplicación en zonas de solapamiento, afectando la eficiencia del uso del agua.

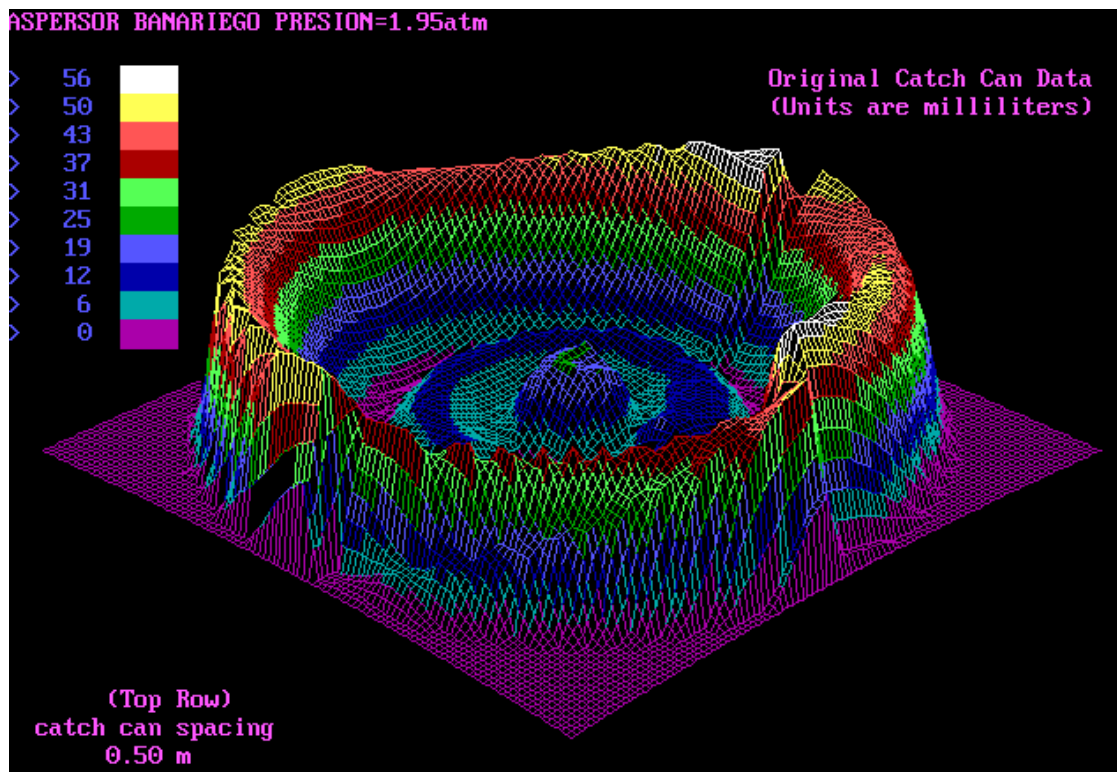


Figura 18. Representación 3D del patrón de distribución del agua en parcela 7x8 m.

4.1.2. Ensayo Método Radial 2

En la segunda evaluación radial se utilizó el aspersor operando a una presión de 0.9 atm, el caudal de descarga fue de 0.17L/s, y los valores se efectuaron bajo condiciones de campo (Figura 19).



Figura 19. Evaluación Método Radial n°2

Balance de masa y eficiencia de captación

El balance de masa realizado en esta evaluación muestra que el volumen total captado es de 0.793 m³, mientras que el volumen descargado fue de 0.612 m³. El programa Catch 3D determina una eficiencia de captación de 129.6%, lo cual, si bien no representa una eficiencia

real, demuestra una acumulación excesiva de agua en determinadas zonas del área regada (Figura 20).

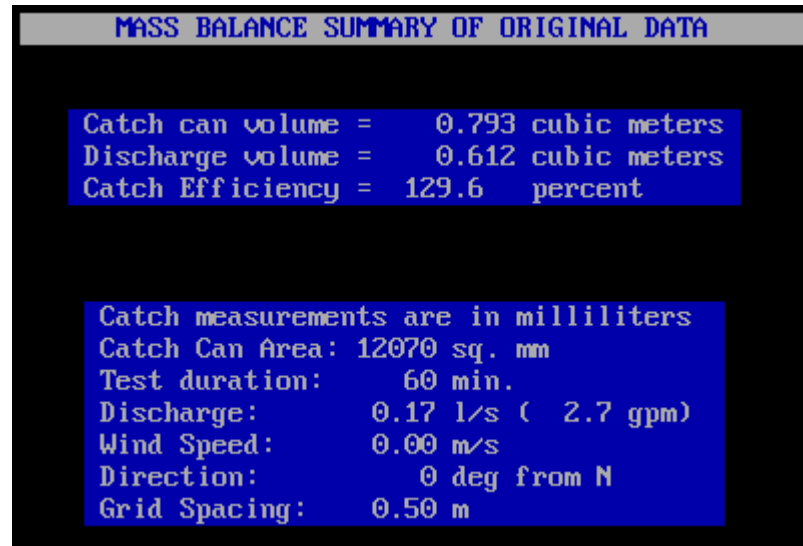


Figura 20: Resultados de Balance de masas en Radial n°2

Uniformidad de Aplicación

S T A T I S T I C S for O R I G I N A L D A T A			
Average Net Application	26.52 ml	Test duration:	60 min.
Average Deviation from Mean	25.06 ml	Discharge:	0.17 l/s
Standard Deviation	35.88 ml		
Skew	2.40		
Kurtosis	9.69		
Average Net Application	2.2 mm/hr	(0.09 in/hr)	
Average Deviation from Mean	2.1 mm/hr	(0.08 in/hr)	
Average Gross Application	1.7 mm	(0.07 in)	
Average Net Application	2.2 mm	(0.09 in)	
Average Depth Highest 10%	9.3 mm	(0.37 in)	
Average Depth Lowest 10%	0.0 mm	(0.00 in)	
Average Depth Low Quarter	0.0 mm	(0.00 in)	
Average Depth Low Half	0.3 mm	(0.01 in)	
App. Eff. Low Quarter (AELQ)	0.0 %		
App. Eff. Low Half (AELH)	19.5 %		
Distribution Uniformity	0.0		
Coefficient of Uniformity (CU):			
CU from Christiansen	5.5	CU from Low Half	15.0
CU from Std. Dev.	-8.0	CU from Distr. Unif.	37.0
CU for alternate offsets	23.5		
Ave. vol./sprinkler spacing	0.79 cu.m	(28.0 cu.ft)	

Figura 21. Resultados Estadísticos de la Distribución del Agua en Radial n°2

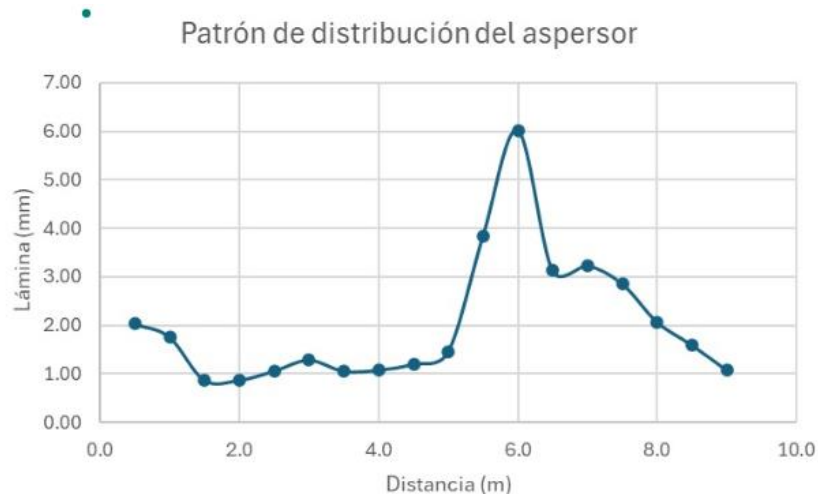


Figura 22. Distribución de lámina en función del radio de alcance - Radial 2

En la **Figura 22** se observa la distribución de la lámina aplicada en función del radio de alcance del ensayo radial 2. El comportamiento observado es similar al del ensayo anterior. Se determina que la lámina no se distribuye de manera uniforme, registrando valores bajos en las zonas cercas del aspersor y aumentando progresivamente hacia la zona media de alcance.

El valor máximo de alcance esta aproximadamente a 6 metros, lo que indica una mayor concentración de agua en esta zona, debiéndose a las características de la boquilla del aspersor y al chorro de agua.

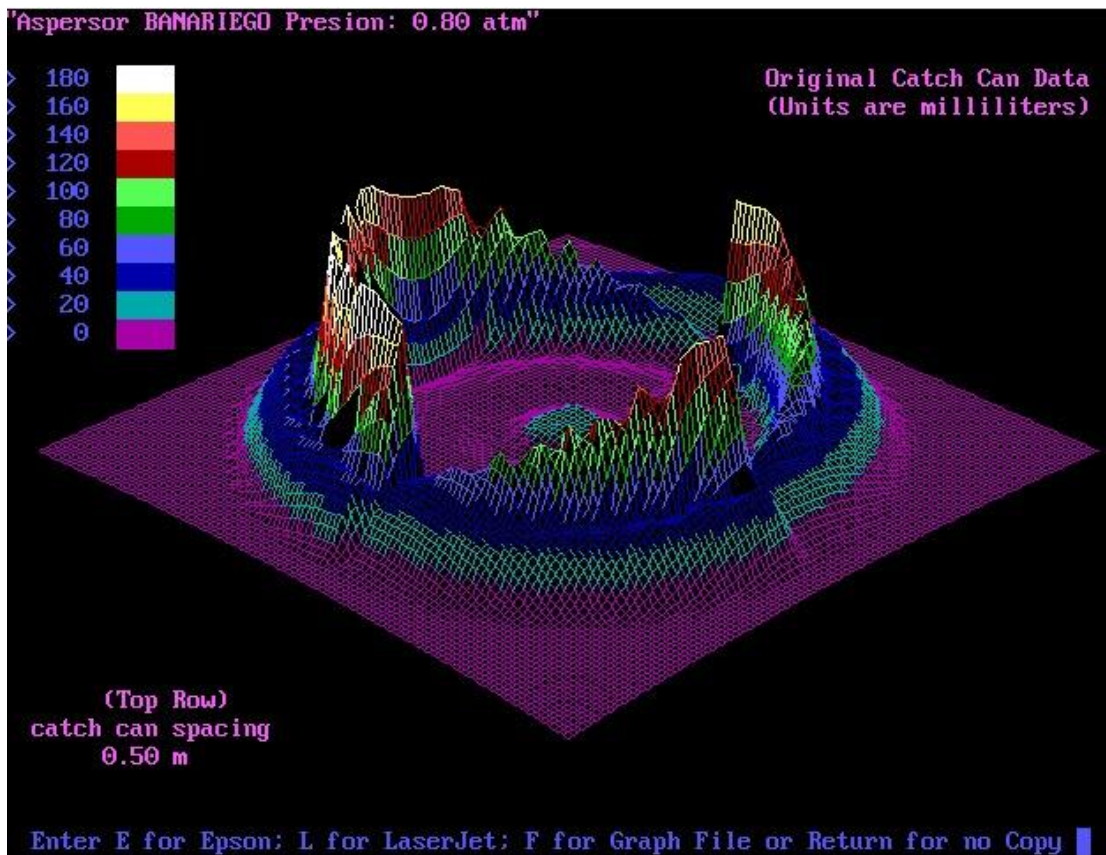


Figura 23. Representación 3D del patrón de distribución en parcela 6x7 operando a 0.8 atm (1)

Según el mapa tridimensional observado en la **Figura 23**, se muestra una distribución no uniforme del agua, con gran concentración a lo largo del radio de alcance del aspersor.

Esto indica que el aspersor presenta un patrón anular, caracterizado por una mayor aplicación en un anillo intermedio (efecto tipo rosquilla), aunque con algunas irregularidades en algunas partes del anillo, y valores bajos en el centro y en los bordes. Este tipo de distribución del agua es muy común en sistemas de impacto o rotativos donde la presión es mínima. Las zonas donde la aplicación del agua es baja o nula está representada en el gráfico por el color violeta, evidenciando que el patrón individual del aspersor no garantiza una distribución uniforme del área regada, haciendo necesario la superposición entre aspersores.

Aunque en el anterior ensayo se mencionó que con un correcto espaciamiento entre aspersores ayudaría a su solapamiento, dando como resultado una mejora en su uniformidad, sin embargo, en este caso, al presentar irregularidades en su anillo es muy probable existan pequeñas zonas donde se presente una baja o sobre aplicación de agua.

4.1.3. Ensayo radial 3

En el tercer ensayo radial con características similares al anterior se observa un aspersor operando a una presión de 0.8 atm, el caudal de descarga fue de 0.17L/s, y los valores se efectuaron bajo condiciones de campo (Figura 24).



Figura 24. Evaluación Método Radial n°3

Balance de masa y eficiencia de captación

El balance de masa realizado en esta evaluación muestra que el volumen total captado es de 0.377 m³, mientras que el volumen descargado fue de 0.601 m³. El programa determinó una eficiencia de captación de 62.7%, lo cual, indica que menos de dos tercios del agua descargada por el aspersor fue interceptada por los recipientes de medición. El 37.3% del volumen descargado no fue captado, lo que sugiere la presencia de pérdidas significativas (Figura 25).

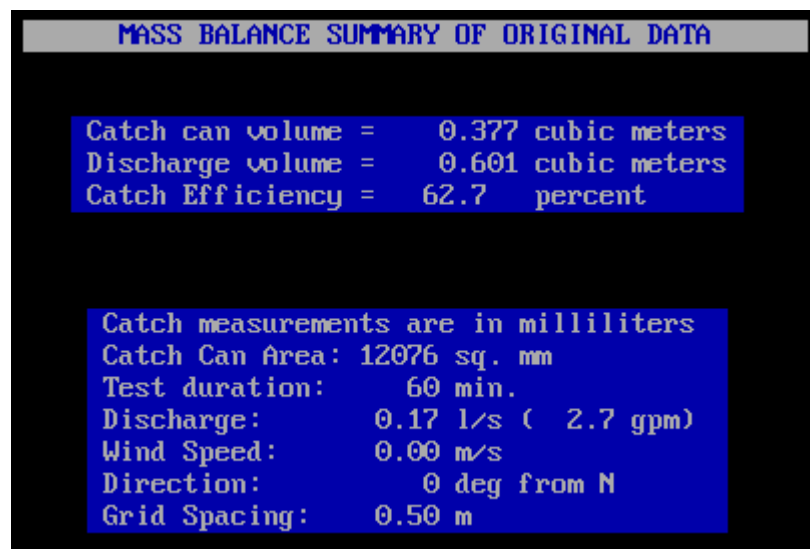


Figura 25. Resultados de Balance de masas en Radial n°3

Uniformidad de Aplicación

El análisis estadístico para el tercer ensayo generó los siguientes datos (Figura 26):

STATISTICS for ORIGINAL DATA			
Average Net Application	14.05 ml	Test duration:	60 min.
Average Deviation from Mean	12.12 ml	Discharge:	0.17 l/s
Standard Deviation	15.62 ml		
Skew	1.50		
Kurtosis	6.01		
Average Net Application	1.2 mm/hr	(0.05 in/hr)	
Average Deviation from Mean	1.0 mm/hr	(0.04 in/hr)	
Average Gross Application	1.9 mm	(0.07 in)	
Average Net Application	1.2 mm	(0.05 in)	
Average Depth Highest 10%	3.9 mm	(0.15 in)	
Average Depth Lowest 10%	0.0 mm	(0.00 in)	
Average Depth Low Quarter	0.0 mm	(0.00 in)	
Average Depth Low Half	0.2 mm	(0.01 in)	
App. Eff. Low Quarter (AELQ)	0.0 %		
App. Eff. Low Half (AELH)	10.6 %		
Distribution Uniformity	0.0		
Coefficient of Uniformity (CU):			
CU from Christiansen	13.8	CU from Low Half	16.9
CU from Std. Dev.	11.3	CU from Distr. Unif.	37.0
CU for alternate offsets	37.1		
Ave. vol./sprinkler spacing	0.38 cu.m	(13.3 cu.ft)	

Figura 26. Resultados Estadísticos de la Distribución del Agua en Radial n°3

La aplicación neta promedio por recipiente fue de 14.05 ml, equivalente a 1.2 mm/h; la desviación estándar 15.62 ml supera a la media, lo que indica una alta dispersión de los datos y una distribución heterogénea.

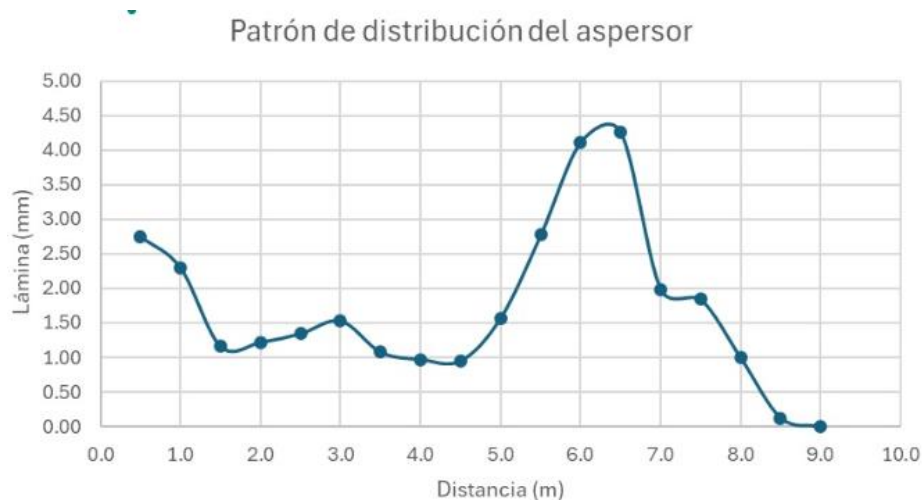


Figura 27. Distribución de la lámina en función del radio de alcance – Radial 3

La **Figura 27** evidencia el patrón de distribución de un aspersor operando a 0.80 atm, donde se observa una acumulación predominante de agua en sectores específicos del radio, especialmente en zonas intermedias, aunque en este caso, la aplicación en el anillo es discontinuo, mientras que el área central y el borde externo presentan valores significativamente menores, es decir, también presenta una distribución tipo rosquilla pero irregular.

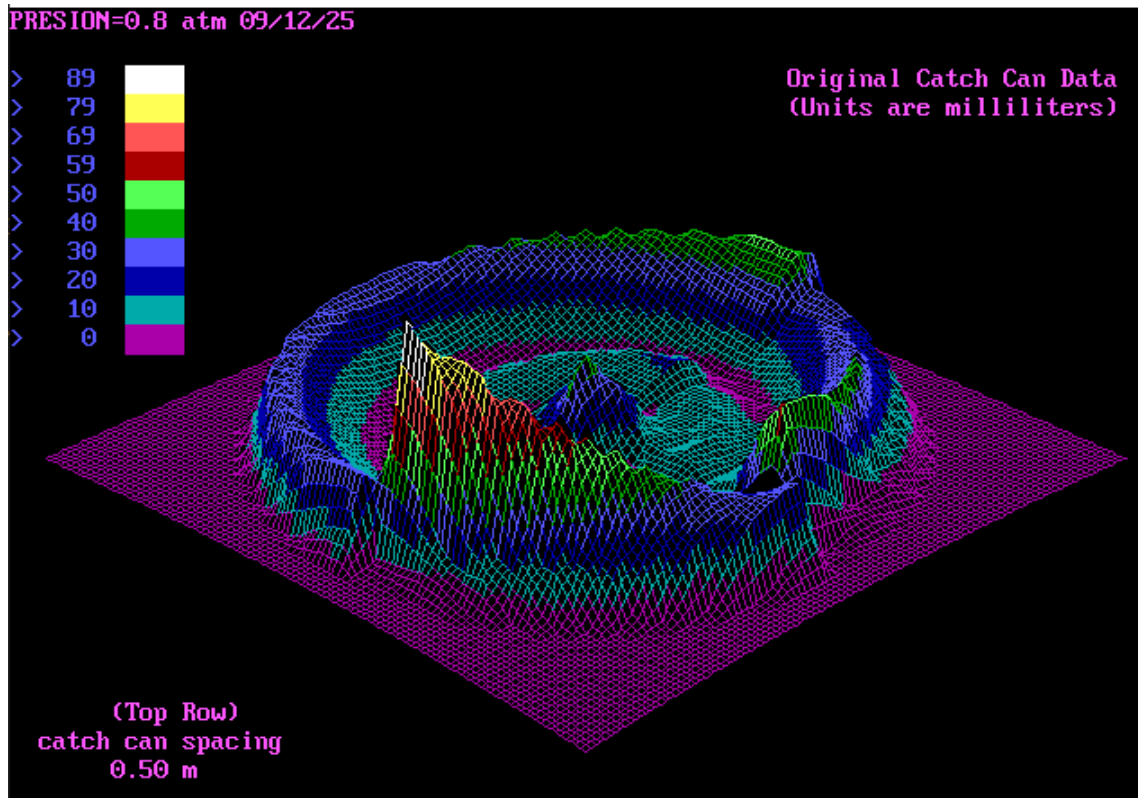


Figura 28. Representación 3D del patrón de distribución en parcela 6x7 operando a 0.8 atm (2)

Asimismo, la superficie tridimensional mostrada en la **Figura 28**, presenta picos pronunciados y depresiones marcadas, lo que refleja inestabilidad en la rotación del aspersor y una atomización insuficiente del agua. Este comportamiento es típico de aspersores operando a presiones inferiores a las recomendadas, donde el chorro no se fragmenta adecuadamente y genera zonas de sobre aplicación y subaplicación.

Al considerar el funcionamiento del aspersor dentro de un sistema de riego, puede llegar a generar limitaciones en la uniformidad de aplicación, ya que el solapamiento entre aspersores no logra compensar de manera efectiva las zonas de baja aplicación, mientras que las áreas de mayor intensidad tienden a superponerse, provocando sobre riego localizado.

La disminución abrupta de la lámina hacia el perímetro del área regada permite identificar el límite efectivo del radio de alcance, el cual se ve reducido en comparación con ensayos realizados a presiones mayores.

4.1.4. Simulación de Uniformidad a partir de los Ensayos Radiales

Se realizaron simulaciones para diferentes dimensiones de parcelas con la finalidad de poder estimar el espaciamiento entre aspersores óptimo y con mejor uniformidad.

Radial 1

Tabla 1. Valores de CUC obtenidos en las simulaciones del Ensayo radial 1

RADIAL 1	CUC
8x8	78,1
7x8	72,3
7x7	61,9
6x7	68,8
6x6	78,3

En la **Tabla 1** se pueden observar los resultados de las simulaciones realizadas a partir del ensayo radial 1, donde la parcela 8x8 m destaca notablemente como la mejor, seguida del dimensionamiento 7x8m. A continuación, en la **Figura 29** se muestra la gráfica 3D de la simulación 8x8m con CUC de 78.1%, valor que es aceptable y se encuentra dentro de lo óptimo según lo establecido en la norma.

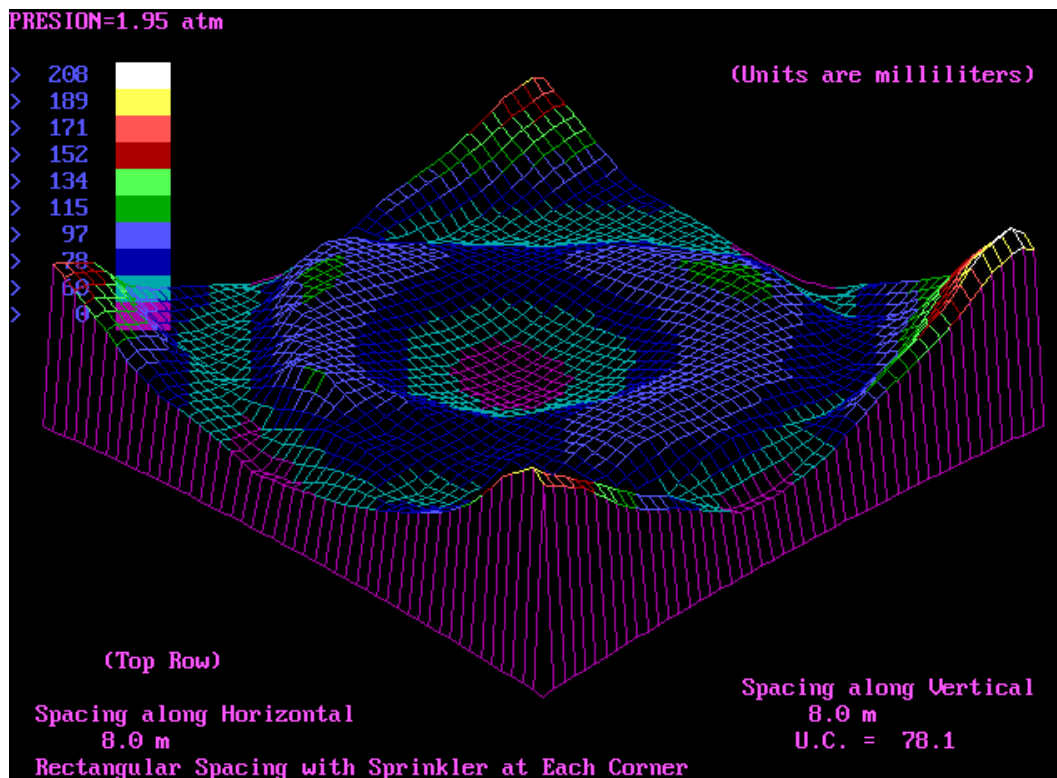


Figura 29. Simulación 8x8 m. del Radial 1

Radial 2

Tabla 2. Valores de CUC obtenidos en las simulaciones del Ensayo radial 2

RADIAL 2	CUC
8x8	59,60
7x8	65,90
7x7	72,80
6x7	72,40
6x6	70,60

En la **Tabla 2** se puede observar los resultados de las simulaciones realizadas a partir del ensayo radial 2, donde la parcela 7x7 m destaca como la mejor, seguida muy de cerca por la parcela 6x7m. A continuación, en la **Figura 30** se mostrará la gráfica 3D de la simulación 7x7 m con CUC de 72.8%, valor que es poco aceptable según lo establecido en la norma.

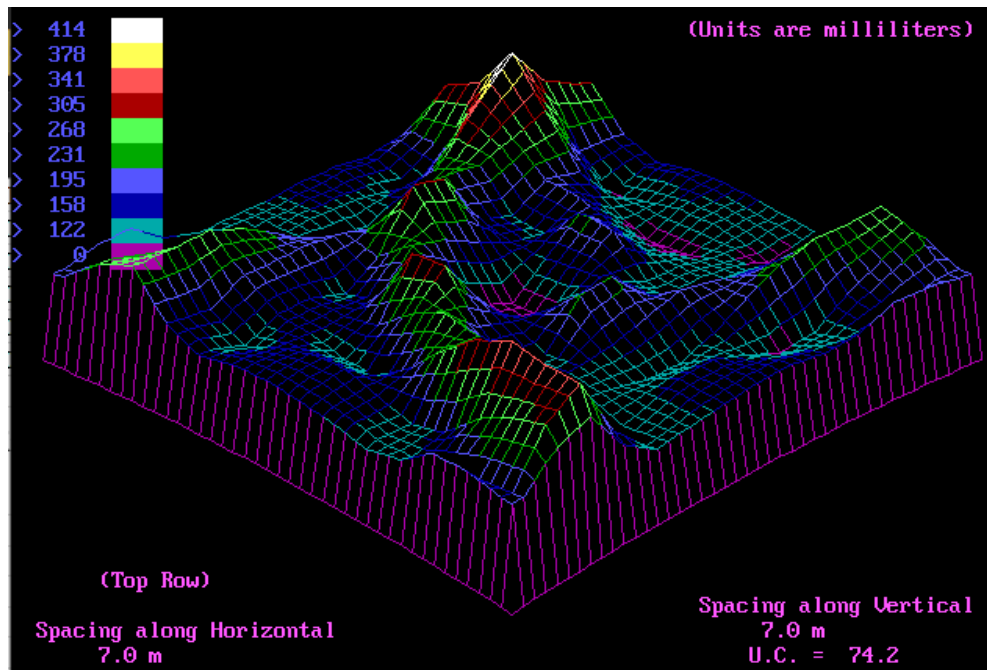


Figura 30. Simulación 7x7 m. del Radial 2

Radial 3

Tabla 3. Valores de CUC obtenidos en las simulaciones del Ensayo radial 3

RADIAL 3	CUC
8x8	66,00
7x8	74,20
7x7	78,70
6x7	74,60
6x6	65,70

En la **Tabla 3** se puede observar los resultados de las simulaciones realizadas a partir del ensayo radial 3, donde la parcela 7x7 m. destaca como la mejor, seguida muy de cerca por la parcela 6x7m. A continuación, en la **Figura 31** se mostrará la gráfica 3D de la simulación 7x7m con CUC de 78.7%, valor que es aceptable y óptimo según lo establecido en la norma.

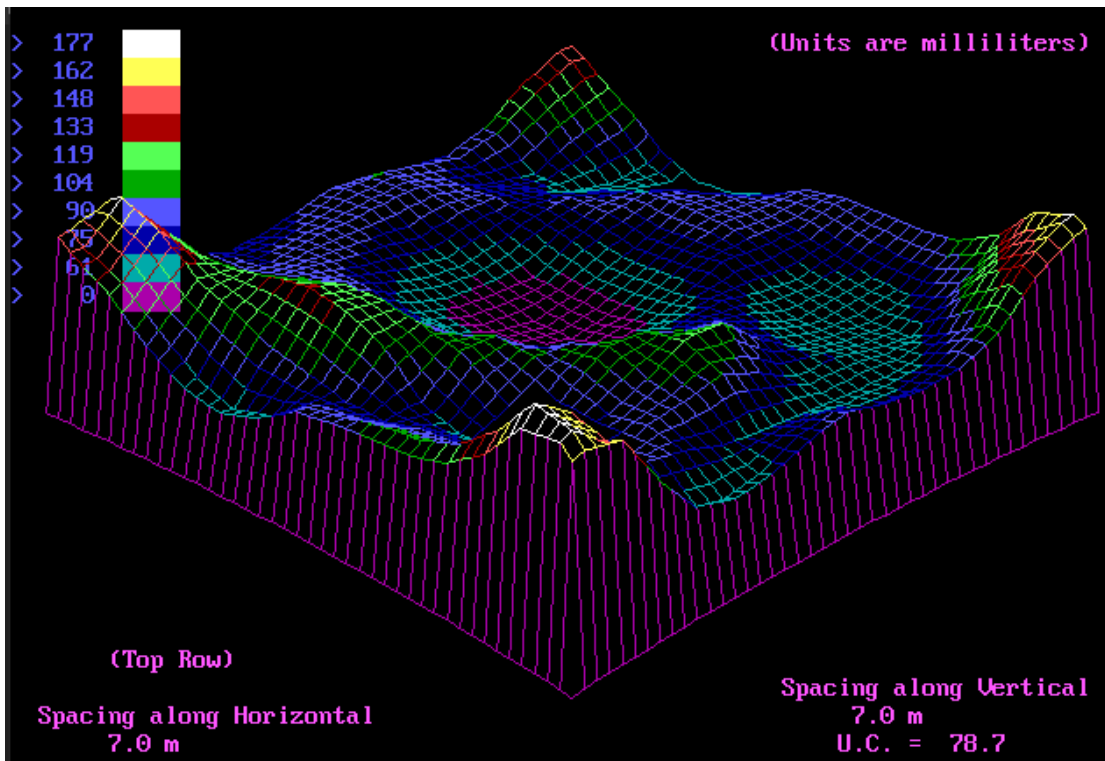


Figura 31. Simulación 7x7 m. del Radial 3

A continuación, se representan los resultados de las simulaciones en la **Figura 32**:

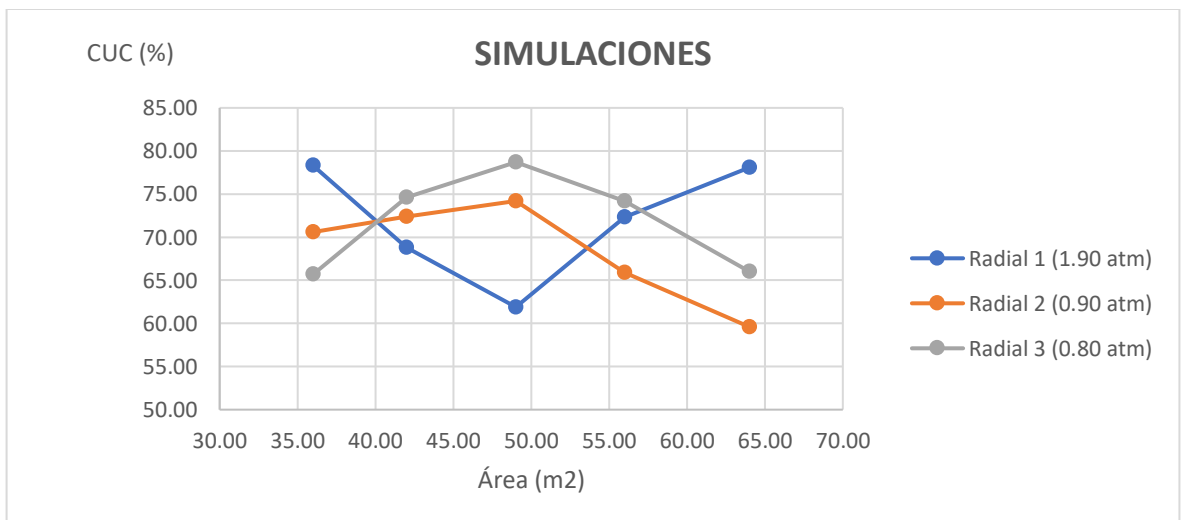


Figura 32. Gráfica representativa de las simulaciones realizadas.

Donde a partir de los resultados en los tres ensayos, se procede a calcular el promedio para cada parcela, como indica en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Promedio de CUC Simulados en cada ensayo Radial

	ÁREA (m²)	RADIAL 1	RADIAL 2	RADIAL 3	PROMEDIO
8x8	36	78.10	59.60	66.00	67.90
7x8	42	72.30	65.90	74.20	70.80
7x7	49	61.90	74.20	78.70	71.60
6x7	56	68.80	72.40	74.60	71.93
6x6	64	78.30	70.60	65.70	71.53

Como se observa en la **Tabla 4**, aunque según la norma ISO 15886:2021 el valor promedio de las simulaciones no cumple el mínimo establecido (75%), las dimensiones con mejor CUC estimado son las parcelas de 6x7 m, 7x7 m y 7x8 m dando como resultado 70,80%, 71,60% y 71,93% respectivamente. Por otro lado, la intensidad de aplicación presenta una disminución progresiva a medida que el área aumenta.

4.2. Análisis de la distribución del agua en la parcela de riego.

Este apartado presenta los resultados obtenidos mediante la ejecución del método de campo completo, con una configuración de espaciamiento (7x8 m) con el objetivo de determinar cómo la disposición de los aspersores influye en los parámetros como el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC), la uniformidad de distribución (DU) y la eficiencia de aplicación en el cuarto más bajo (AELQ).

4.2.1. Evaluación Campo Completo 7x8m

Características del sistema:

- **Tipo de aspersor:** Banariego, modelo ASPE000114 ½”
- **Presión de operación:** 1.95 atm
- **Altura de instalación:** 0.7 m sobre el suelo
- **Caudal por aspersor:** 0.17 l/s

- **Condiciones ambientales:** No se considera la interacción del viento (nula)
- **Distancia entre colectores:** 1 m en una malla regular
- **Tiempo de operación:** 60 minutos.

La selección de este distanciamiento se obtuvo de la literatura (Andrade et al., 2022) y en el radio de alcance observado en los ensayos radiales previos, considerando que el distanciamiento mínimo entre emisores no debe exceder el 50-60% de diámetro regado para tener un solapamiento adecuado.

Resultados de Configuración

La utilización de 4 aspersores en disposición rectangular 7x8 m operando en un tiempo de 60 minutos mostró un balance de masa muy bueno desde el punto de vista volumétrico. El volumen total recogido por los 72 colectores fue de 0.580 m³, mientras que el volumen descargado a partir del caudal de los aspersores fue de 0.616 m³, obteniendo una eficiencia de captación del 94.2% (Figura 33).

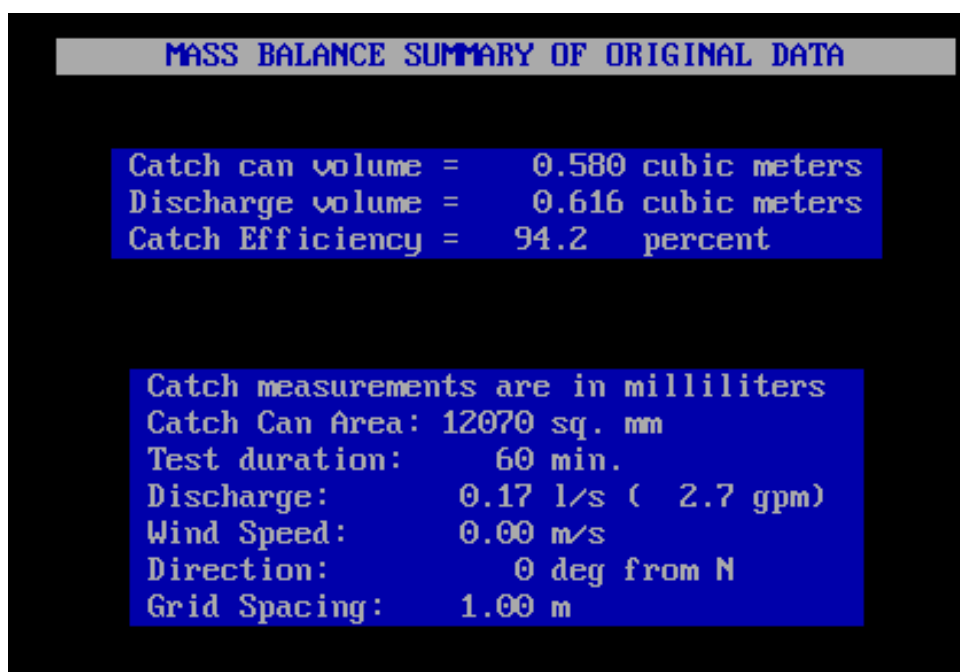


Figura 33: Balance de masa Campo Completo 7x8 m

Al ser un valor muy cercano al 100% estaría indicando que las pérdidas por derivas o evaporación fueron mínimas durante el ensayo, principalmente a las condiciones ambientales favorables. Esta pequeña diferencia del 5.8% puede deberse a:

- La evaporación directa de las gotas en suspensión
- Errores de medición
- Intercepción por el follaje del césped

El análisis estadístico de los 72 colectores determinó una aplicación neta promedio de 8.1 mm/h. Sin embargo, la distribución espacial determinó una desviación estándar de 46.09 ml, indicando una alta variación entre puntos de medición.

Coefficiente de uniformidad de Christiansen (CUC)

El coeficiente de uniformidad de Christiansen obtenido fue de 64.5%, resultado que se clasifica como “pobre” según los criterios establecidos por Keller y Bliesner (2000), quienes categorizan los sistemas de riego de la siguiente manera:

- Excelente: CUC > 90%
- Bueno: CUC entre 80% y 90%
- Aceptable: CUC entre 70% y 80%
- Pobre: CUC < 70%

La uniformidad de distribución (DU), que representa la relación entre la lámina promedio del 25% de los puntos menos regados y la lámina de promedio total, fue de 46%, muy por debajo del 80%, y la eficiencia en el cuarto inferior (AELQ) de 43.3% como baja según la ISO 15886-3 (**Figura 34**).

STATISTICS for ORIGINAL DATA			
Average Net Application	97.29 ml	Test duration:	60 min.
Average Deviation from Mean	34.57 ml	Discharge:	0.17 l/s
Standard Deviation	46.09 ml		
Skew	0.92		
Kurtosis	5.02		
Average Net Application	8.1 mm/hr	(0.32 in/hr)	
Average Deviation from Mean	2.9 mm/hr	(0.11 in/hr)	
Average Gross Application	8.6 mm	(0.34 in)	
Average Net Application	8.1 mm	(0.32 in)	
Average Depth Highest 10%	15.7 mm	(0.62 in)	
Average Depth Lowest 10%	2.2 mm	(0.09 in)	
Average Depth Low Quarter	3.7 mm	(0.15 in)	
Average Depth Low Half	5.2 mm	(0.21 in)	
App. Eff. Low Quarter (AELQ)	43.3 %		
App. Eff. Low Half (AELH)	60.9 %		
Distribution Uniformity	46.0		
Coefficient of Uniformity (CU):			
CU from Christiansen	64.5	CU from Low Half	64.7
CU from Std. Dev.	62.2	CU from Distr. Unif.	66.0
CU for alternate offsets	80.3		
Ave. vol./sprinkler spacing	0.58 cu.m	(20.5 cu.ft)	

Figura 34: Datos estadístico de la configuración 7x8 m real

Los resultados que se obtuvieron en las simulaciones, en comparación con los alcanzados en el ensayo real a campo completo, presentan algunas diferencias y similitudes. En cuanto al CUC del ensayo se obtuvo uno del 64,5%, que comparado con la simulación del radial 2 que es 64,10%, deja en evidencia la cercanía de las predicciones; aunque en la uniformidad de distribución el ensayo arroja un valor de 46% mientras que en la simulación se muestra un valor de 53,7%, cantidades no tan alejadas, pero sí con más variación que su CUC.

Patrón espacial de distribución

En el mapa de distribución de la lámina aplicada (**Figura 35**), se muestra un patrón de cuatro picos definidos a la ubicación del aspersor, esto quiere decir, que los mayores volúmenes se encuentran en los colectores que están cerca del aspersor formando “montañas” de aplicación que alcanzan hasta los 230 ml. A diferencia en las zonas localizadas en el centro donde el volumen alcanzado es inferior a 55 ml, demostrando el solapamiento insuficiente entre los aspersores.

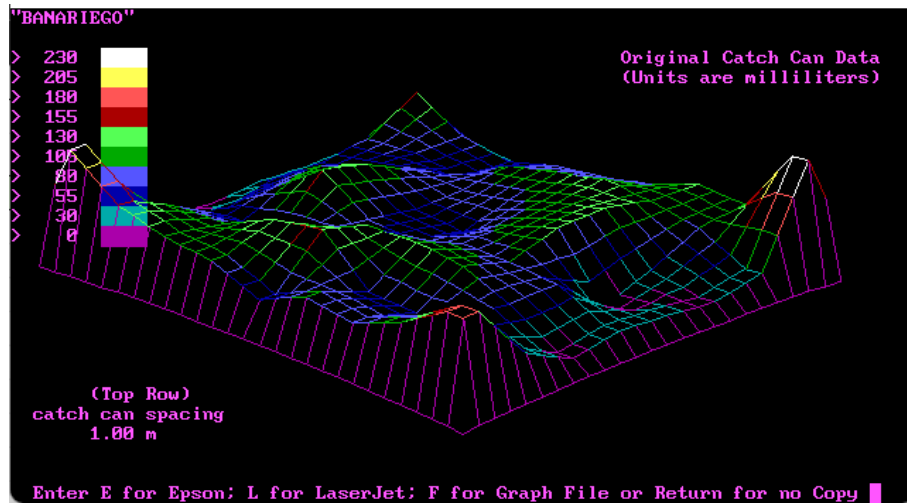


Figura 35: Mapa de distribución de lámina aplicada para configuración 7 × 8

Si se compara la imagen anterior con las gráficas de la simulación de radiales para la misma dimensión, se observan diferencias claras en la forma y magnitud del patrón de distribución.

La simulación correspondiente a una presión de 1,95 atm presenta una superficie más suavizada y continua, con gradientes menos abruptos entre zonas de alta y baja acumulación, lo que se refleja en una mayor uniformidad espacial del patrón (Figura 36).

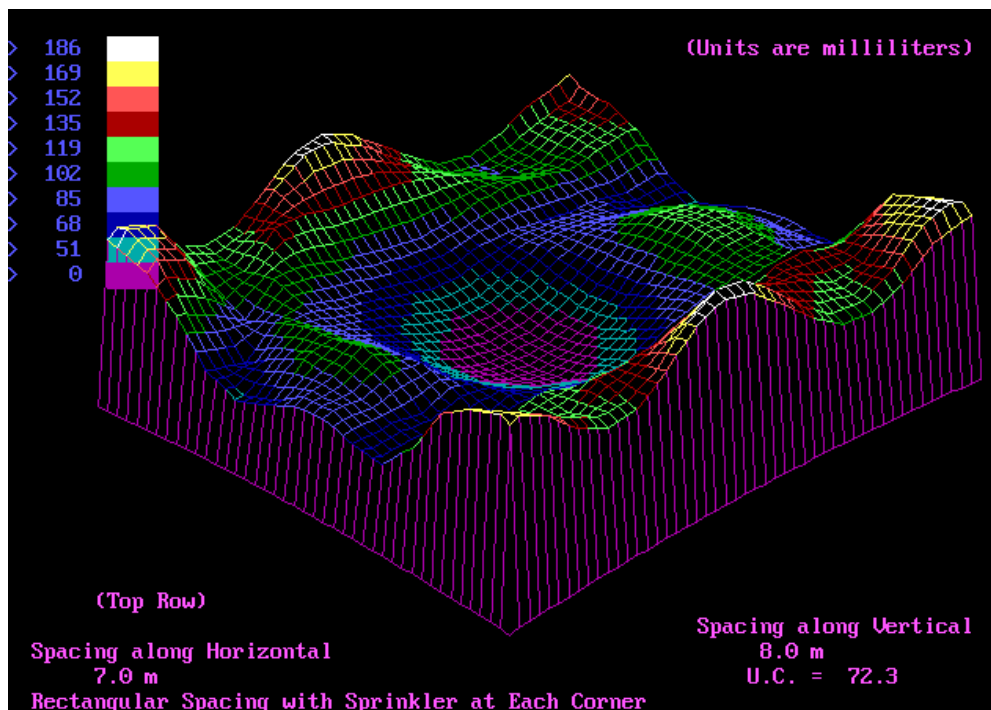


Figura 36. Mapa de distribución de lámina aplicada - Simulación Radial 1

En contraste, las simulaciones realizadas a 0,8 atm de presión evidencian superficies con mayores irregularidades, picos localizados y depresiones más pronunciadas, lo que indica una mayor sensibilidad del patrón de distribución a las variaciones angulares del ensayo radial bajo bajas presiones de operación. Si bien ambas simulaciones a 0,8 atm mantienen el mismo espaciamiento, se observan diferencias en la forma del patrón, atribuibles a la variabilidad propia del ensayo radial utilizado como dato de entrada (**Figura 37 y Figura 38**).

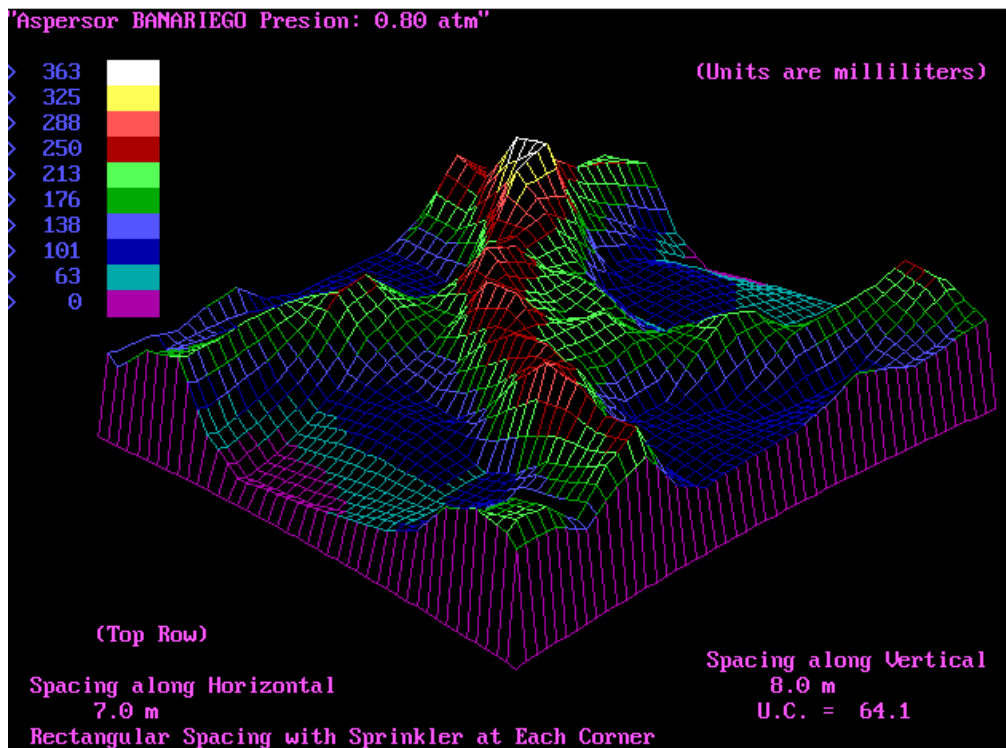


Figura 37. Mapa de distribución de lámina aplicada - Simulación Radial 2

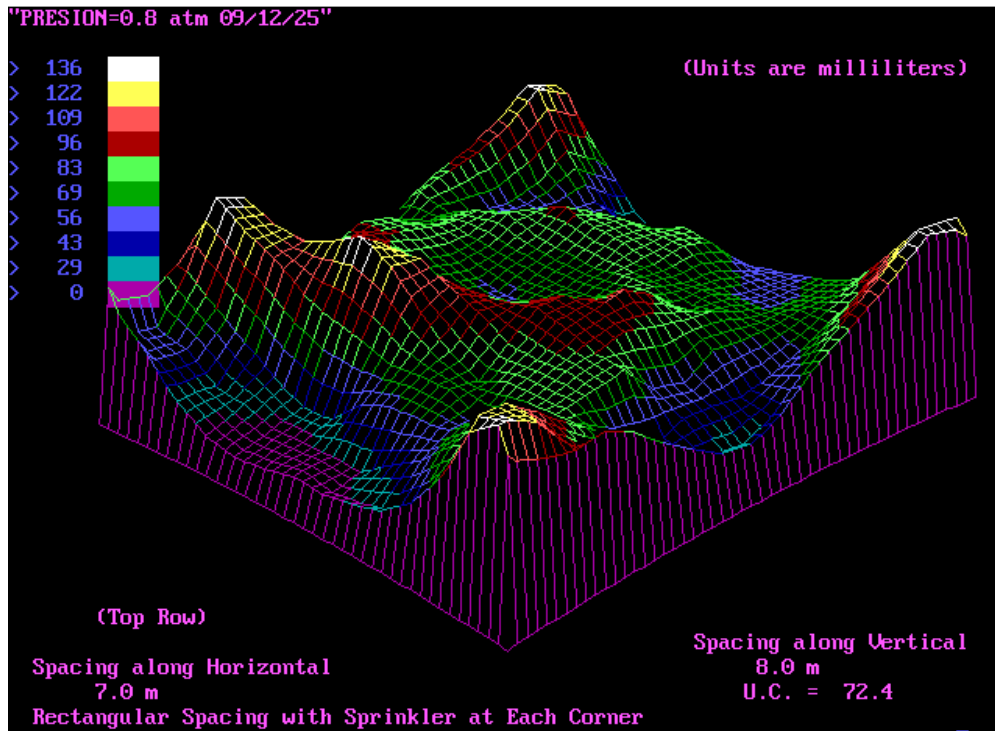


Figura 38. Mapa de distribución de lámina aplicada - Simulación Radial 3

Cabe recalcar que los resultados del ensayo deberían guardar más similitud con las dos últimas simulaciones ya que se ejecutaron a una presión similar.

4.2.2. Evaluación Campo completo 6x7 m

Características del sistema evaluado:

- **Tipo de aspersor:** Banariego, modelo ASPE000114 ½”
- **Presión de operación:** 0.9 atm
- **Altura de instalación:** 0.7 m sobre el suelo
- **Caudal por aspersor:** 0.17 l/s
- **Condiciones ambientales:** No se considera la interacción del viento (nula)
- **Distancia entre colectores:** 1 m en una malla regular
- **Tiempo de operación:** 60 minutos.

Tras las simulaciones realizadas con las pruebas radiales preliminares se seleccionó como dimensión óptima para realizar de manera real a Campo completo la de 6x7m por motivos de mejor relación calidad precio y poder corroborar en efecto los valores de uniformidad estimados. Tras la prueba de pluviometría se pudo obtener los siguientes datos representados en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Valores obtenidos del Ensayo de pluviometría para CC 6x7m

Lecturas de los Pluviómetros (ml)

	1	2	3	4	5	6	7	8	Promedio	
Distancia (m)	0	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00		
1	0	140.0	125.0	112.0	117.0	80.0	50.0	67.0	235.0	115.75
2	1.00	137.0	90.0	70.0	75.0	80.0	70.0	60.0	55.0	79.63
3	2.00	107.0	58.0	45.0	65.0	70.0	90.0	4.0	65.0	63.00
4	3.00	100.0	70.0	52.0	43.0	65.0	90.0	113.0	65.0	74.75
5	4.00	102.0	65.0	55.0	60.0	70.0	100.0	105.0	70.0	78.38
6	5.00	67.0	85.0	90.0	90.0	85.0	80.0	85.0	100.0	85.25
7	6.00	131.0	115.0	75.0	95.0	128.0	115.0	105.0	170.0	116.75

Datos que ingresados en el programa proporcionan las siguientes estadísticas del riego para esta parcela como puede verse en la **Figura 39**.

STATISTICS for ORIGINAL DATA			
Average Net Application	87.64 ml	Test duration:	60 min.
Average Deviation from Mean	25.39 ml	Discharge:	0.10 l/s
Standard Deviation	35.09 ml		
Skew	1.42		
Kurtosis	7.72		
Average Net Application	7.3 mm/hr	(0.29 in/hr)	
Average Deviation from Mean	2.1 mm/hr	(0.08 in/hr)	
Average Gross Application	6.6 mm	(0.26 in)	
Average Net Application	7.3 mm	(0.29 in)	
Average Depth Highest 10%	13.0 mm	(0.51 in)	
Average Depth Lowest 10%	3.4 mm	(0.14 in)	
Average Depth Low Quarter	4.4 mm	(0.17 in)	
Average Depth Low Half	5.2 mm	(0.20 in)	
App. Eff. Low Quarter (AELQ)	66.3 %		
App. Eff. Low Half (AELH)	78.2 %		
Distribution Uniformity	60.5		
Coefficient of Uniformity (CU):			
CU from Christiansen	71.0	CU from Low Half	71.4
CU from Std. Dev.	68.1	CU from Distr. Unif.	75.1
CU for alternate offsets	84.3		
Ave. vol./sprinkler spacing	0.41 cu.m	(14.3 cu.ft)	

Figura 39: Datos estadísticos de la prueba de Campo Completo 6x7m

Donde se evidencia la similitud del Cu con los obtenidos en las simulaciones del ensayo radial, manteniéndose con un Coeficiente de Christensen de 71% y una uniformidad de Distribución 60.5 junto con un AELQ de 66,3% que, aunque sigue sin cumplir lo requerido por la norma ISO 15886 mejoró evidentemente a los resultados obtenidos en el ensayo de Campo Completo de 7x8m realizado en primer lugar.

Como se muestra en la **Figura 40**, su representación tridimensional incluso se observa un poco más uniforme, mostrando una evidente mejora al cambio de espaciamiento.

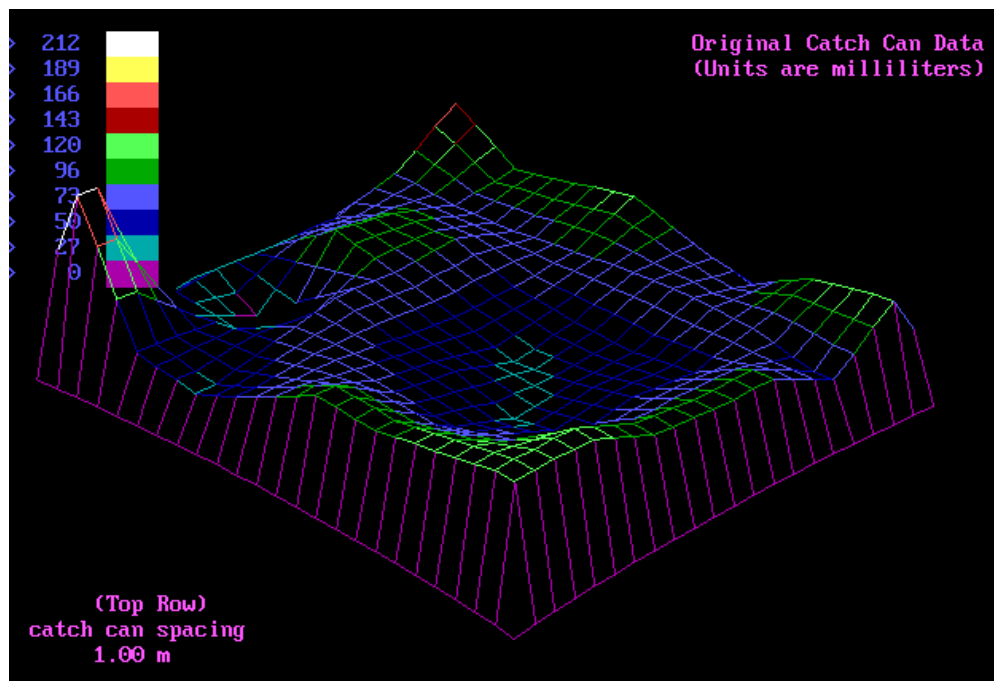


Figura 40. Mapa de distribución de lámina aplicada – Ensayo CC 6x7m.

Si se compara la imagen anterior con las gráficas de la simulación de radiales para la misma dimensión, se observan diferencias claras en la forma y magnitud del patrón de distribución.

La simulación correspondiente a una presión de 1,95 atm presenta una superficie más irregular y con picos, con gradientes algo abruptos entre zonas de alta y baja acumulación, lo que se refleja en una menor uniformidad espacial del patrón (**Figura 41**).

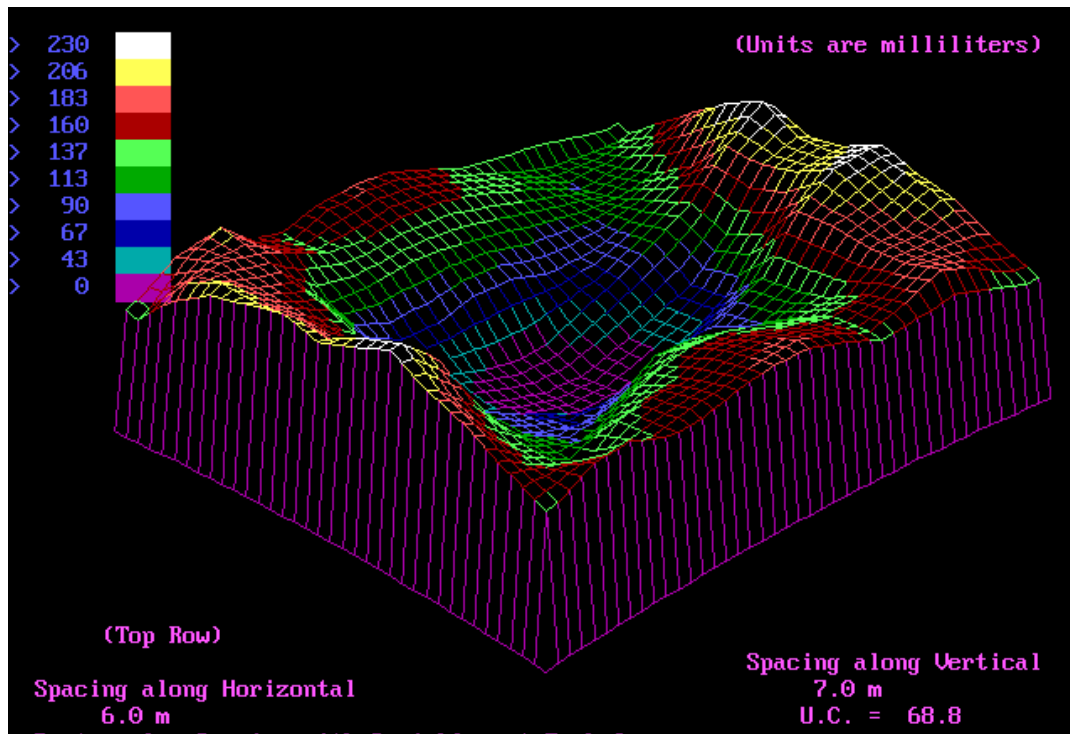


Figura 41. Mapa de distribución de lámina aplicada - Simulación Radial 1

Por otro lado, las simulaciones realizadas a 0,9 – 0.8 atm de presión evidencian superficies también con irregularidades, picos localizados y depresiones más pronunciadas en la simulación 2, lo que indica una mayor sensibilidad del patrón de distribución a las variaciones angulares del ensayo radial bajo bajas presiones de operación, contrario a la simulación 3 que presenta un patrón más suave. Si bien ambas simulaciones de 0.85 y 0,9 atm mantienen el mismo espaciamiento, se observan diferencias en la forma del patrón (**Figura 42 y Figura 43**).

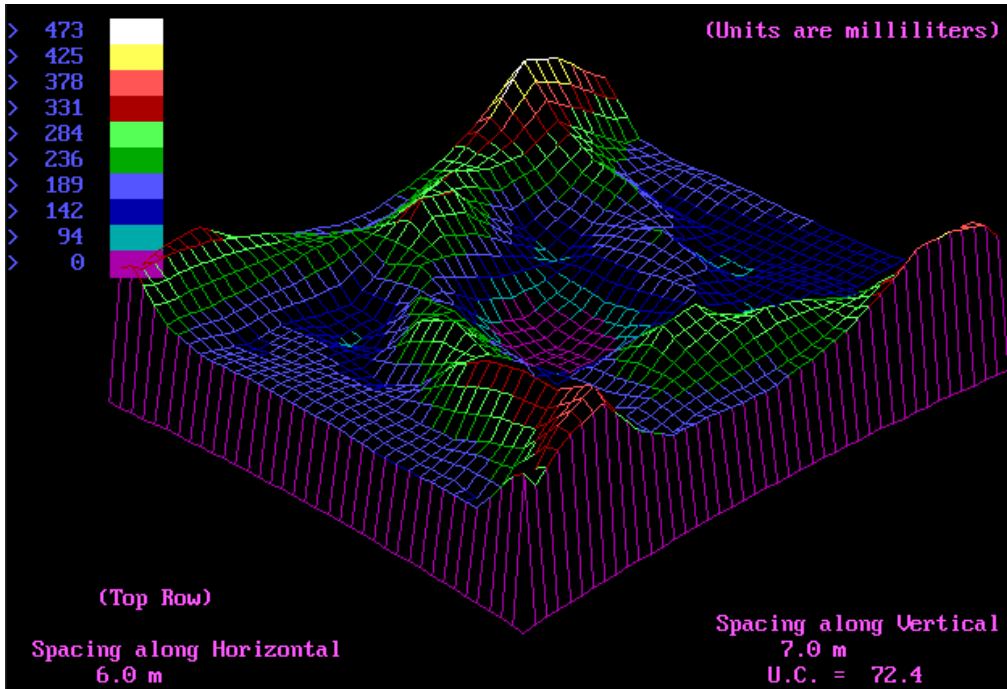


Figura 42. Mapa de distribución de lámina aplicada - Simulación Radial 2

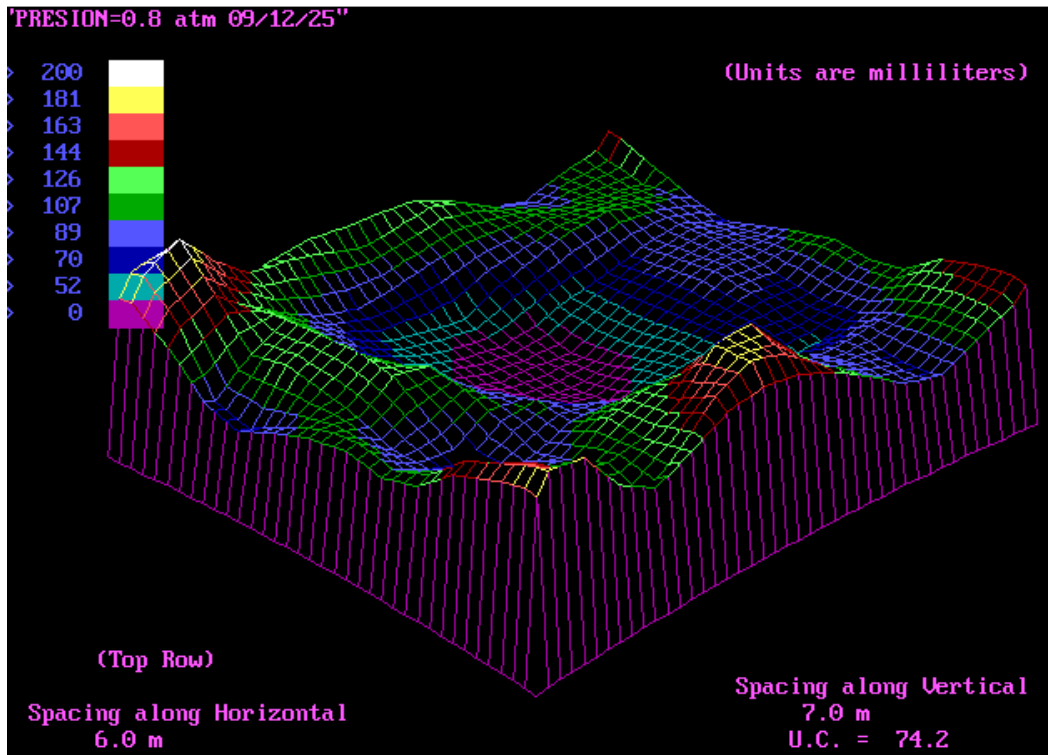


Figura 43. Mapa de distribución de lámina aplicada - Simulación Radial 3

4.3. Análisis de la redistribución del agua en el suelo

El análisis de la redistribución del agua en el suelo permite comprender cómo se aplica el agua durante el riego, capacidad de drenaje del suelo, velocidad de redistribución del agua y los patrones de humedad residual después del riego. Para evaluar estos parámetros, se realizaron mediciones de humedad en 2 días claves: el 18 de junio del 2025 y el 23 de junio del 2025. Estas mediciones, tomadas con un sensor DELTA-T HH2 a 10 cm de profundidad en una malla rectangular de 8x9, revelan la redistribución hídrica en el suelo franco-arcilloso de Rio Chico.

DISTRIBUCIÓN DE HUMEDAD									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	39.6	40.1	39.3	40.9	40.2	40.5	38.6	40.2	38.6
B	39.9	39.3	39.5	40.4	40.6	39.6	40.0	39.0	41.4
C	40.6	39.9	39.8	41.0	40.1	40.4	39.3	40.2	40.1
D	40.3	40.5	41.5	40.0	40.5	40.1	40.2	40.0	40.6
E	39.3	40.4	40.3	41.0	40.7	40.5	39.4	39.3	39.0
F	40.7	40.1	39.9	39.0	40.4	41.4	39.8	49.3	39.3
G	40.5	40.2	39.5	40.8	39.6	41.0	40.2	39.8	39.8
I	40.3	40.1	41.1	39.1	40.4	40.2	41.2	40.5	42.6
PROMEDIO	40.3			%					
RANGO	38.6 - 49.3			%					

Figura 44: Distribución de la humedad del 18 de junio del 2025

Los datos en la **Figura 44** muestran que el suelo presentaba un contenido de humedad promedio de 40.3 % con una desviación estándar de 1.9%. Destaca un valor anómalo de 49.3% en la posición F8, probablemente por la topografía de la zona o una acumulación local por escorrentía.

Cuatro días después (**Figura 45**), el promedio de la medición de humedad descendió a 39.9% mientras que la desviación estándar se redujo a 0.8%. Esto indica una redistribución horizontal que fluyó desde las áreas más húmedas a las más secas, compensando de cierta manera las desigualdades de humedad.

DISTRIBUCIÓN DE HUMEDAD										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	40.6	39.7	39.9	40.2	40.3	39.9	37.2	40.1	40.0	
B	39.3	39.2	40.1	39.2	40.0	40.5	40.3	38.6	39.4	
C	39.3	38.8	39.5	39.5	39.7	40.4	38.9	40.5	40.0	
D	40.5	39.5	40.6	40.2	39.9	39.9	39.2	40.3	39.2	
E	39.4	40.3	40.1	39.8	39.8	41.0	39.5	40.8	39.4	
F	40.1	39.9	40.4	38.5	40.1	39.9	40.6	40.5	40.9	
G	39.9	40.2	39.2	41.3	40.2	40.1	40.7	40.0	39.2	
H	40.2	40.2	39.8	40.5	40.2	40.3	40.6	39.0	40.5	
PROMEDIO			39.9		%					
RANGO			37.2 - 41		%					

Figura 45: Distribución de humedad post 4 días

Este análisis demuestra una ventaja comparativa de los suelos de Rio Chico para la agricultura, ya que esta posee una capacidad de retención adecuada, redistribuyendo de manera horizontal la humedad y homogenizando su contenido.

4.4. Definición del Plan de mejora para incrementar la uniformidad y eficiencia del riego.

Como se puede observar, en el primer ensayo a campo completo tomando los valores originales in situ, se revela que el sistema con la configuración 8x9 opera de manera ineficiente, presentando un coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) de solo 64.5%. Esta baja uniformidad se debe al mal espaciado entre aspersores y la presión en la que se trabaja, limitando la eficiencia de riego.

En este contexto, los ensayos radiales ejecutados cumplieron un papel fundamental, ya que permitieron conocer el patrón de distribución de un aspersor aislado en diferentes condiciones de presión. Estos valores se utilizaron como dato de entrada en el programa “Catch 3D” para simular diferentes escenarios de campo completo sin la necesidad de realizar nuevos ensayos en el lugar de trabajo. Obteniendo de igual manera los valores del coeficiente de uniformidad al modificar los espaciados entre aspersores para identificar cual configuración es óptima para aumentar la uniformidad de riego.

Tomando como base el análisis de los resultados experimentales y de simulación, se propone un plan de mejora para incrementar la uniformidad y eficiencia del riego estructurado basado en dos opciones, teniendo en cuenta la intervención económica y de alto impacto.

La primera opción consiste en la modificación de los espaciamientos entre aspersores que será orientada a partir de los datos obtenidos en las simulaciones. Según los resultados de la simulación se indica que la configuración 7x7 m tomando como dato de entrada los ensayos radiales, se obtuvo un coeficiente de uniformidad del 74.20% trabajando con una presión de 0.9 atm y 78.70% trabajando con una presión de 0.8 atm. Este resultado muestra que con una modificación geométrica del sistema se puede favorecer la uniformidad del riego. Por lo cual, se recomienda seguir la distribución de aspersores a esta configuración de 7x7 m en toda el área regada. Esta modificación tiene la ventaja de requerir una inversión mínima, ya que solo se debería posicionar de mejor manera los aspersores, teniendo una base para futuras mejoras.

La segunda opción se basa en mejorar la presión de operación del sistema. Si bien los ensayos radiales que trabajaron a una presión de 1.95 atm tuvieron un desempeño más favorable. Para esto, se debe calibrar la unidad de bombeo, verificar y realizar inspecciones en las tuberías para evitar posibles residuos, y realizar un balance hídrico entre laterales para garantizar una distribución equitativa. Estos ajustes conllevan a una inversión más elevada, pero podrían aumentar 3 a 5 puntos porcentuales al Coeficiente de uniformidad y estabilizar el sistema en un rango de 1.5 a 2 atm. Es fundamental instalar manómetros en puntos estratégicos para controlar y monitorear la presión de manera constante.

4.4.1. Acciones Complementarias

- Valorar sustitución de aspersores por dos boquillas
- Regar en horarios con baja influencia de viento (antes de las 10:00 am o después de las 4:00 pm)
- Mantener evaluaciones sistemáticas al sistema de riego (2 veces al año), para comprobar su estabilidad funcional.

Este plan de mejora establece metas a cumplir en un año: elevar el coeficiente de uniformidad a un rango de 82 – 85%, incrementar la eficiencia del cuarto más bajo por encima

del 75%, de igual manera aumentar la uniformidad de distribución. Este plan de mejora ofrece una guía viable para transformar un sistema de riego ineficiente en un sistema uniforme, contribuyendo el uso sostenible del recurso hídrico de la zona.

V. CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos planteados y los resultados obtenidos, y considerando la selección prioritaria de la configuración 7×7 m por su mejor equilibrio eficiencia-calidad-costo para el cultivo de césped, se presentan las siguientes conclusiones:

- Los aspersores evaluados presentaron un patrón de distribución radial tipo “rosquilla”, caracterizado por una baja lámina en el centro y mayor concentración en un anillo intermedio. El radio efectivo empezó a disminuir con la reducción de la presión, mostrando menor alcance y mayor irregularidad en condiciones de baja presión. La eficiencia de captación en los ensayos de campo completo varió entre 66.4% y 96.5%, evidenciando una influencia significativa de la configuración y las condiciones de operación sobre el desempeño hidráulico del sistema. Los resultados demuestran que, bajo una adecuada disposición geométrica y presión estable, es posible alcanzar niveles de eficiencia óptimos.
- La configuración 7×7 m mostró un Coeficiente de Uniformidad (CU) alto en simulaciones, lo que la posiciona como la mejor opción entre uniformidad, costo y eficiencia para riego de césped con el aspersor evaluado. Cumpliendo con el mínimo del 75% establecido por la norma ISO 15886, se considera aceptable para cultivos de menor sensibilidad a variaciones de humedad como el césped, siempre que se implementen ajustes complementarios. Su implementación conjunta con las mejoras técnicas propuestas puede incrementar la uniformidad efectiva en campo y optimizar el uso del agua.
- Por último, se elaboró un plan de mejora por etapas que establece una guía precisa para el uso del agua y mejorar la eficiencia del riego y la uniformidad. El plan identifica como la opción más viable por calidad-precio sería la reconfiguración del marco de riego, disposición que demostró una mejora en el coeficiente de uniformidad. Sin embargo, el análisis demostró que este ajuste espacial no resulta eficiente por sí solo, ya que no resuelve el déficit en zonas

con menor aplicación. Para ello se propone optimizar la presión y reemplazar los aspersores para que permitan alcanzar los parámetros recomendables de uniformidad y eficiencia.

Se concluye que, la baja eficiencia de riego es un problema técnico con solución técnica, y que mediante evaluaciones y mejoras es posible optimizar el uso del agua en sistemas de riego por aspersión.

VI. RECOMENDACIONES

- Priorizar las modificaciones de los espaciamientos reconfigurando el marco de riego a 7x7 m, ya que esta configuración demostró ser la más favorable y económica.
- Evaluar la uniformidad de riego con espaciamiento triangular de 7x7 m, con el fin de valorar si presenta una mejor uniformidad.
- Realizar ensayos 2 veces al año para detectar a tiempo déficits en la uniformidad de riego.
- Realizar limpiezas de boquillas, verificar de manera visual la rotación de los aspersores cada 30 días y una revisión general de los filtros y de la presión de operación.
- Para mantener las mejoras, es necesario implementar un protocolo de operación. Se recomienda que la programación de riego sea en horarios nocturnos (Entre las 19:00 pm y 5:00 am) para evitar las pérdidas por evaporación, y la duración del riego debe ajustarse a 45-50 minutos para reducir los riesgos por escorrentía.
- Se debe implementar un sistema básico de monitoreo con cuatro pluviómetros ubicados de manera estratégica y la medición de humedad periódicamente con el sensor Delta-T HH2 para guiar la frecuencia de riego.
- Se recomienda un estudio específico que ayude a verificar las interacciones del viento en el riego para generar curvas de corrección al sistema.
- Realizar una verificación rápida de presión antes de cada riego programado.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, J. R. (03 de Marzo de 2020). *SCRIBD*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/449835495/Guia-para-diseno-agronomico-e-hidraulico-para-riego-por-aspersion>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Andrade, L. M., Pacheco, J. C., Costa, G. L., Alencar, C. A., & França da cunha, F. (2022). UNIFORMITY OF WATER DISTRIBUTION BY A SPRINKLER IRRIGATION SYSTEM ON A SOCCER FIELD. *Bioscience Journal*, 38. Obtenido de Biosciense Journal: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/57028/33379>
- Barboza Blanco, J. J., & Mijahuanca Chuquillanque, J. (14 de Septiembre de 2022). *Evaluación del Coeficiente de Uniformidad y Eficiencia de Aplicación del sistema de riego por aspersión Veras- Sector de Yerba Buena- Cajamarca*. Obtenido de Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo: <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/11565>
- BASCOMEX. (31 de Julio de 2023). *¿Cómo se dividen los tipos de sistemas de riego por aspersión?* Obtenido de BASCOMEX: <https://bascomex.com/blogs/news/como-se-dividen-los-tipos-de-sistemas-de-riego-por-aspersion>
- Cárdenas. (2019). *DSPACE.ESPOL*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/14874/1/Dise%C3%B1o%20e%20instalacion%20de%20un%20sistema%20de%20riego%20por%20aspersion%20para%2050%20Ha.%20de%20cultivo%20de%20palma.pdf>
- Elhussiny, K. T., Hassan, A. M., Habssa, A. A., & Mokhtar, A. (2023). *Prediction of water distribution uniformity of sprinkler irrigation system based on machine learning algorithms*. Obtenido de Nature: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-47688-3>
- Espinosa, M. (2011). *Diseño e Instalación de un Sistema de Riego por Aspersión para 50 Ha. de cultivo de Palma Aceitera en la provincia del Guayas*. Obtenido de ESPOL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/14874/1/Dise%C3%B1o%20e%20instalacion%20de%20un%20sistema%20de%20riego%20por%20aspersion%20para%2050%20Ha.%20de%20cultivo%20de%20palma.pdf>
- FAO. (2015). *FACTORES QUE SE DEBEN CONSIDERAR PARA CONSIDERAR EL SISTEMA DE RIEGO MÁS ADECUADO*. Obtenido de FAO: <https://www.fao.org/4/aj470s/aj470s02.pdf>

- Hussain, Z., Liu, J., Chauhdary, J. N., Zhao, Y., & Wang, Y. (2025). Evaluating the hydraulic performance of rotating spray plate sprinklers. *Journal of Agricultural Engineering*, *LVI*:1773.
- ISO. (2021). *Characterization of distribution and test methods*. International Organization for Standardization, Geneva. Obtenido de INTERNATIONAL STANDARD ISO 15886-3: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cdn.standards.iteh.ai/samples/78122/4eeda5960fa84f12b95ce41f8e578114/ISO-15886-3-2021.pdf
- Joselyn, B. C. (2021). *Repositorio.upse*. Obtenido de <https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/28059c11-e3b5-4217-9827-a7b60ab71233/content>
- Kay, M. (2013). Smallholder irrigation technology: Prospects for sub-Saharan Africa. *FAO & International Water Management Institute*.
- Keller, J., & Bliesner, R. D. (2000). *Sprinkler and Trickle Irrigation*. Caldwell, New Jersey: The Blackburn Press.
- Kostenko, M., Teterin, V., Melnichuk, D., Mitrofanov, S., & Alexey, P. (Enero de 2021). *Experimental studies of the parameters of a positional sprinkler system*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/352657088_Experimental_studies_of_the_parameters_of_a_positional_sprinkler_system
- Martinez Elizondo, R. (1991). *Riego Localizado, Diseño y Evaluacion*. Universidad Autonoma Chapingo.
- Martínez, A. (2025). *Sistema de riego por aspersión en cultivo de pasto mejorado Comuche - Catache – Santa Cruz - Cajamarca*. Obtenido de Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo: <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/14358>
- Martinez, M. (Octubre de 2013). *Tecnologías para el Uso Sostenible del Agua*. Obtenido de FAO: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/Tecnologias_para_el_uso_sostenible_del_agua.pdf
- Montero, J. (2020). *Métodos de evaluación de sistemas de riego en campo*. Obtenido de Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.
- Palacios, C., Díaz, T., Munguía, J., Partida, L., Velásquez, T. d., & Lopez, B. (Febreo de 2017). *Relación entre indicadores de desempeño y la calidad del riego utilizando pivote central*.

Obtenido de Scielo: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342017000100039

Palti, J. (1981). Cultural practices and infectious crop diseases. *Springer-Verlag*.

Peralta, J. M., & Simpfendorfer, C. (Febrero de 2001). *RIEGO POR ASPERSIÓN*. Obtenido de Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA): chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/<https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/0340e3be-f94f-4fc1-92d2-e143055740ba/content>

Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (5 de abril de 2012). *Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving*. Obtenido de Science Direct: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>

Pino Puebla, Y. (1 de diciembre de 2020). *Diseño hidráulico de sistemas de riego para jardines en Cuba*. Obtenido de SCIELO: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542020000400005&script=sci_arttext&tlng=es

Plaván, A., & Mateos, L. (2006). Ingeniería del riego. *Mundi Prensa*.

Playán, E., & Mateos, L. (2006). Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural Water Management*, 80, 110-116. Obtenido de Agricultural Water Management: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377405002921>

Poma, I., & Chipana, G. (junio de 2016). *Estudio del comportamiento hidráulico relacionado a la uniformidad de aplicación*. Obtenido de Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182016000100004

Qureshi, W. A., Xiang, Q., Xu, Z., & Fan, Z. (2023). Study on the irrigation uniformity of impact sprinkler under low pressure with and without aeration. *Frontiers in Energy Research*, 11. Obtenido de <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2023.1135543/full>

Thompson, T. L., & James, L. G. (1985). Water droplet impact and soil seal formation. *Transactions of the ASAE*, 28(5), 1508-1512.

VIII. ANEXOS

8.1. Ejecución de ensayos y toma de datos



Figura 46. Colocación de pluviómetros para pruebas



Figura 47. Campo listo para realizar prueba de radio de alcance



Figura 48. Toma de datos obtenidos en pruebas pluviométricas



Figura 49. Preparación de área para prueba de campo completo



Figura 50. Medición de humedad del suelo



Figura 51. Recolección de datos en prueba de campo completo

8.2. Resultados de Simulaciones de pruebas Radiales

8.2.1. Ensayo Radial 1

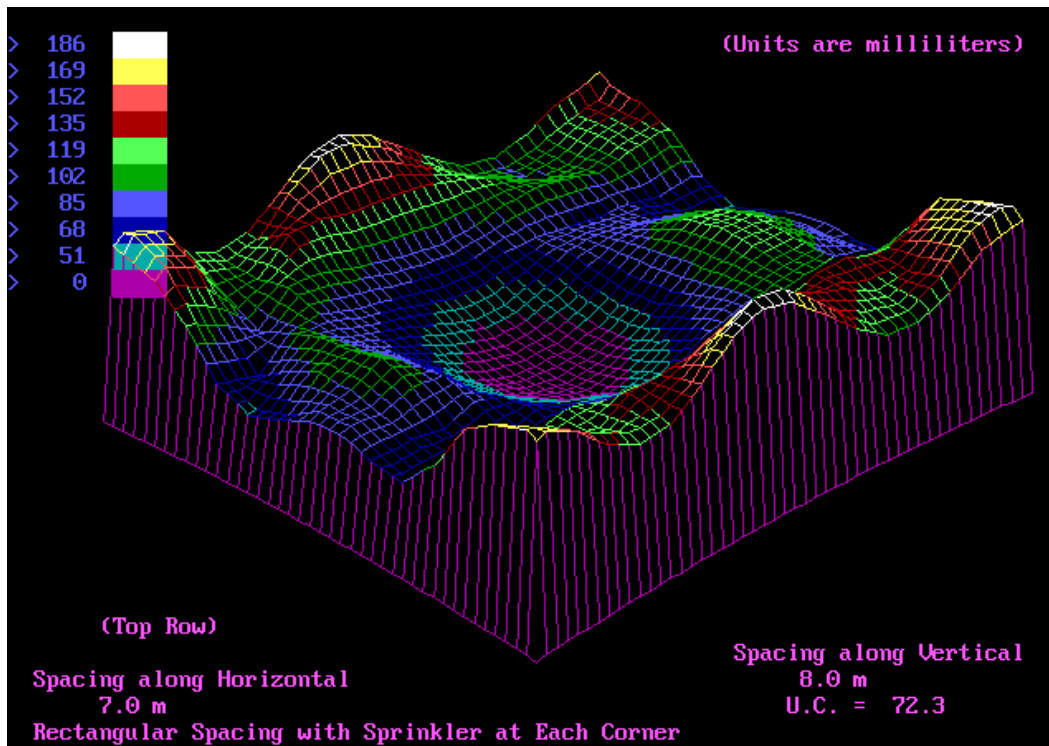


Figura 53. Gráfica 3D de simulación 7x8m - Radial 1

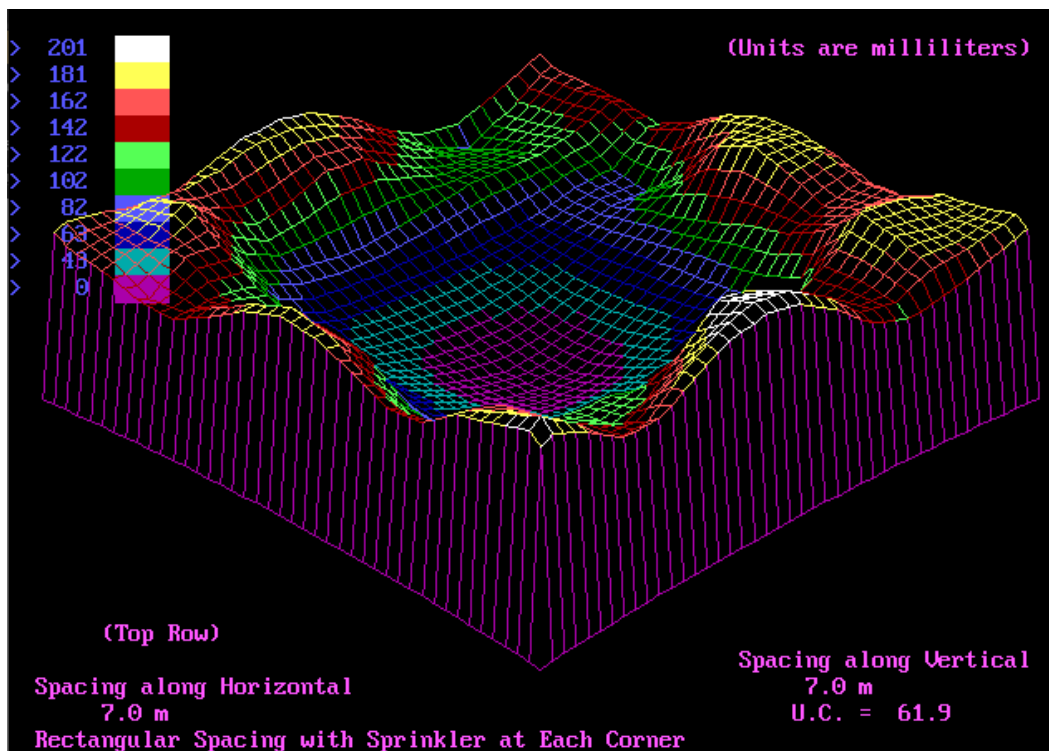


Figura 54. Gráfica 3D de simulación 7x7m - Radial 1

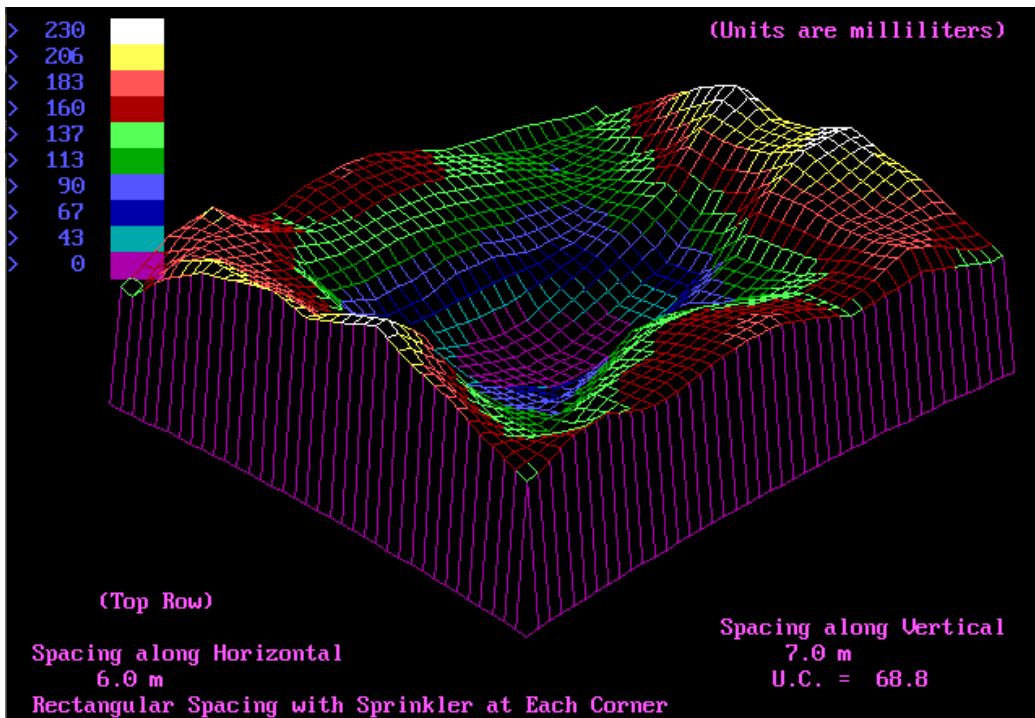


Figura 55. Gráfica 3D de simulación 6x7m - Radial 1

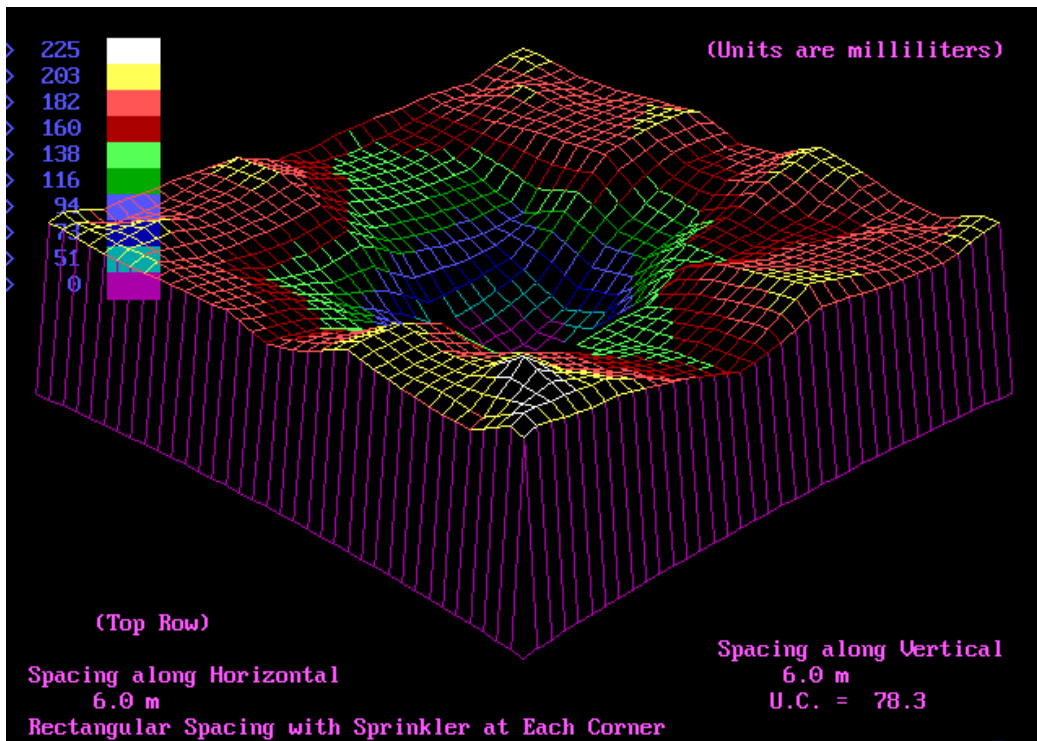


Figura 56. Gráfica 3D de simulación 6x6m - Radial 1

8.2.2. Ensayo Radial 2

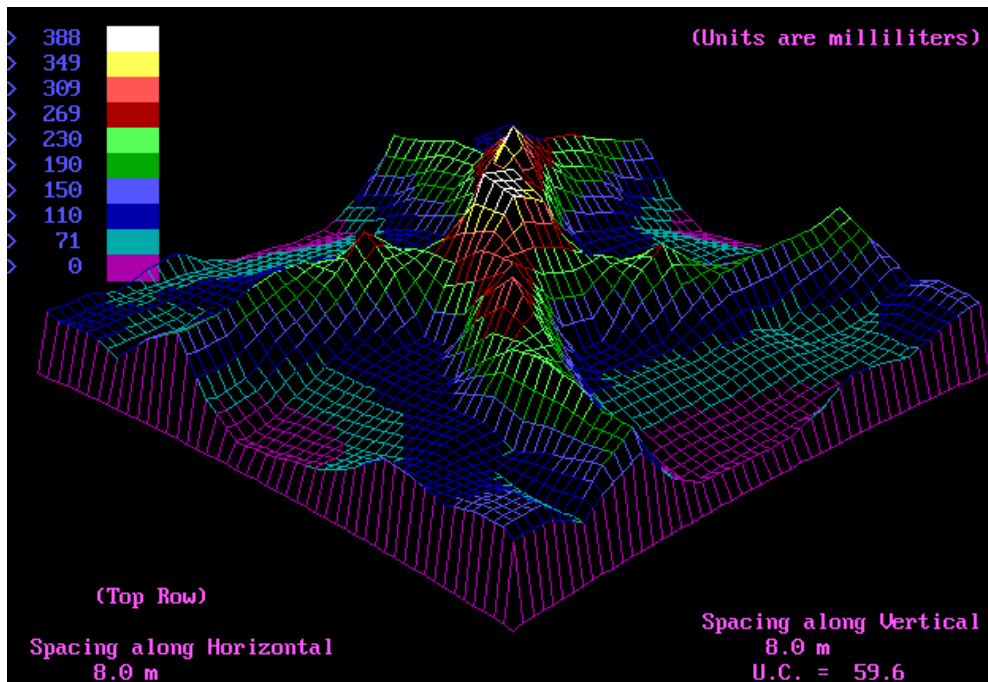


Figura 57. Gráfica 3D de simulación 8x8m - Radial 2

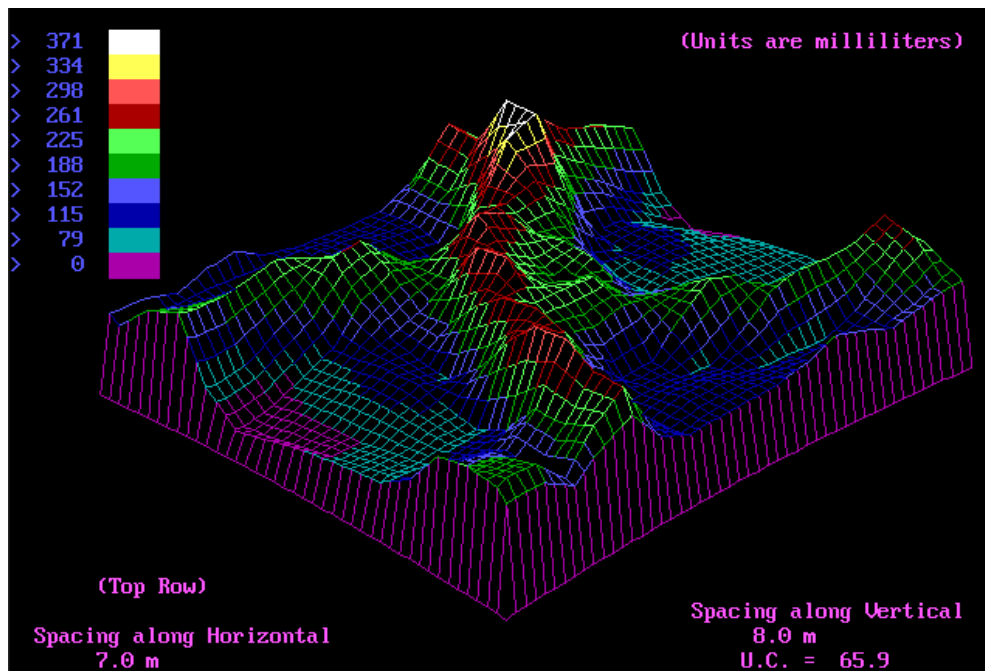


Figura 58. Gráfica 3D de simulación 7x8m - Radial 2

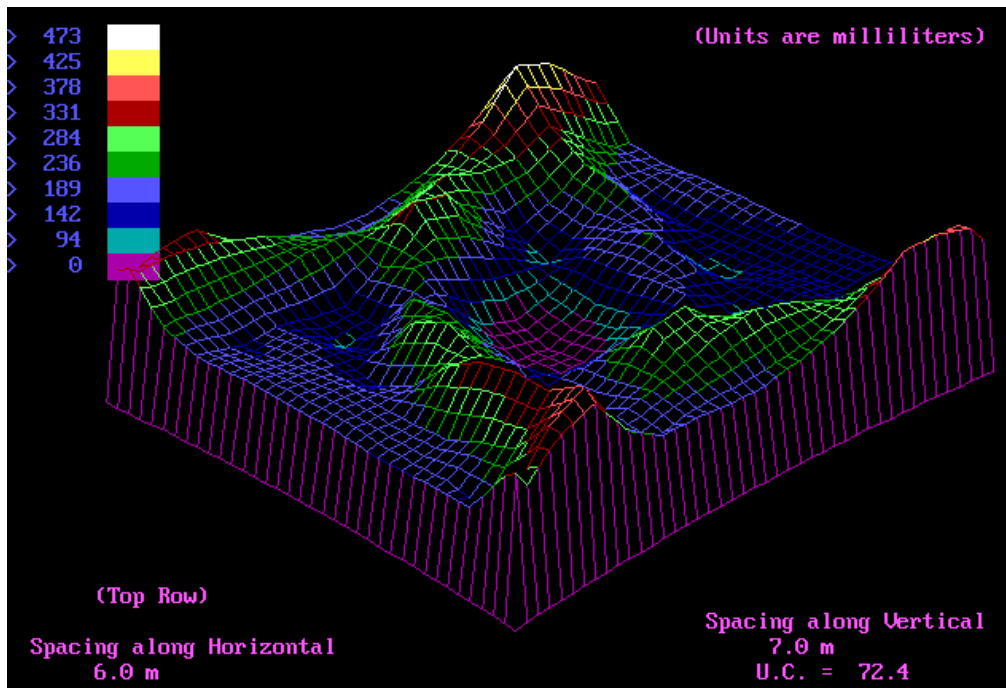


Figura 59. Gráfica 3D de simulación 6x7m - Radial 2

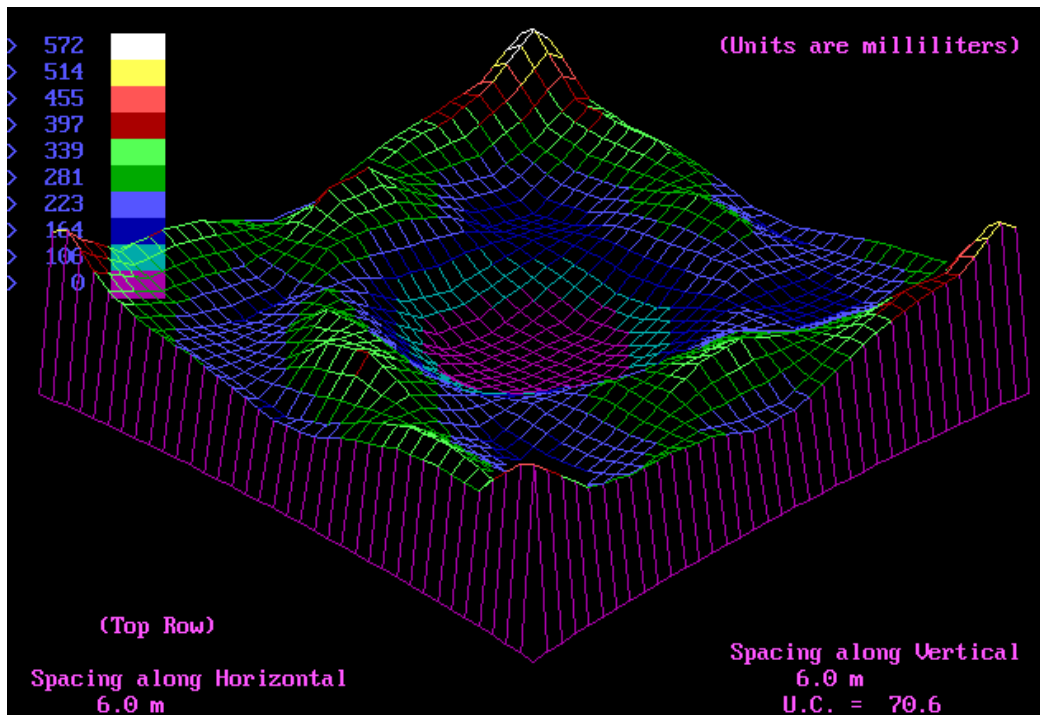


Figura 60. Gráfica 3D de simulación 6x6m - Radial 2

8.2.3. Ensayo Radial 3

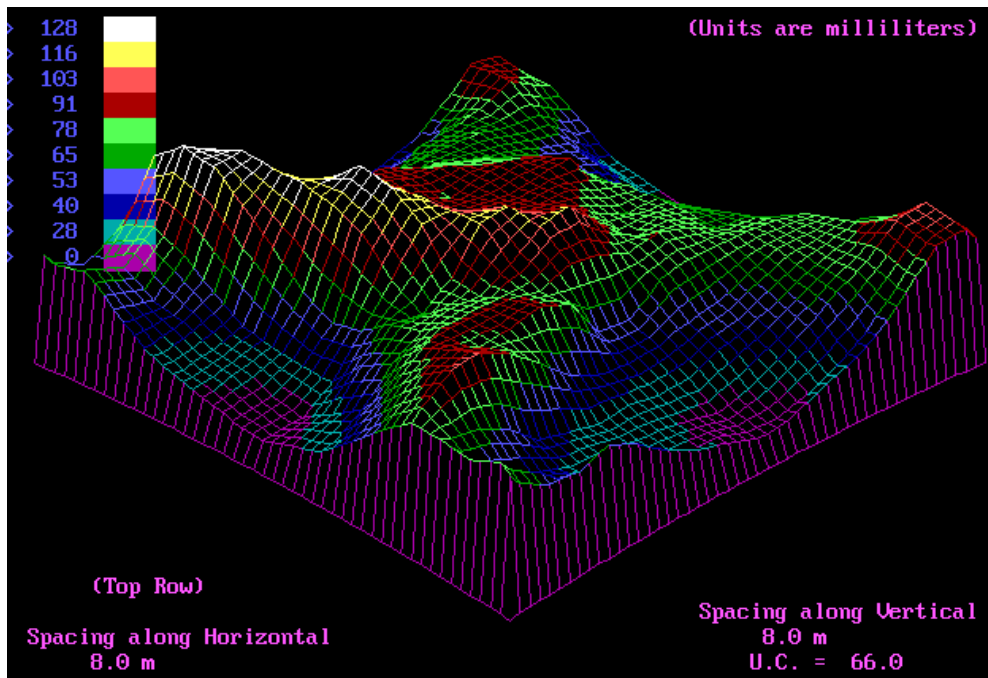


Figura 61. Gráfica 3D de simulación 8x8m - Radial 3

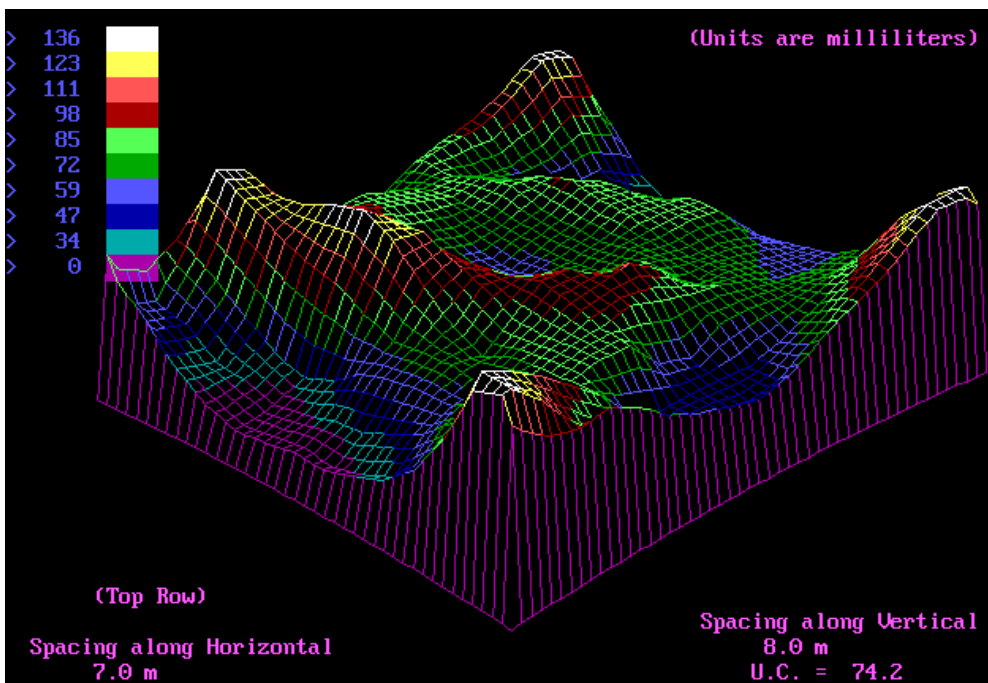


Figura 62. Gráfica 3D de simulación 7x8m - Radial 3

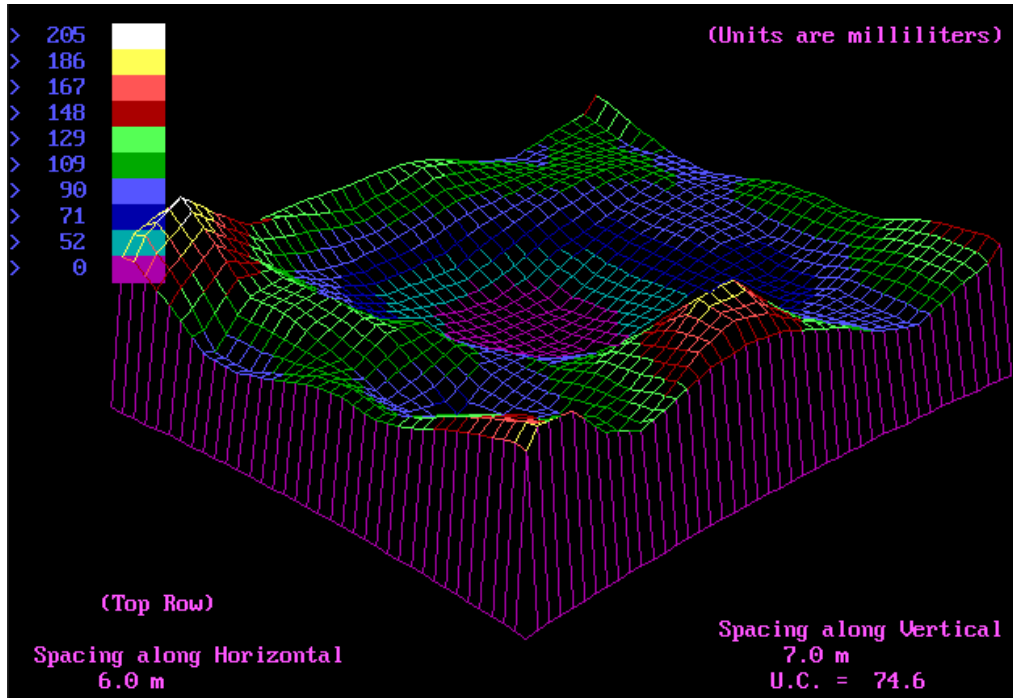


Figura 63. Gráfica 3D de simulación 6x7m - Radial 3

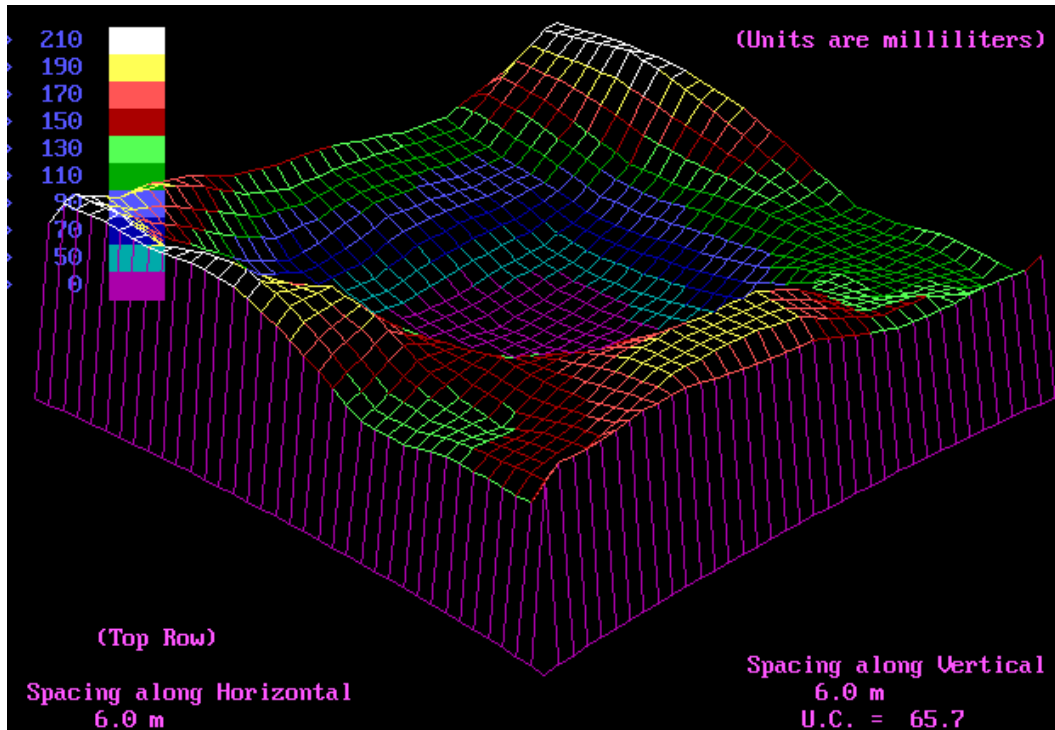


Figura 64. Gráfica 3D de simulación 6x6m - Radial 3