

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



EVALUACIÓN TÉCNICA DE UN ASPERSOR DE IMPACTO.

GABRIEL ANTONIO SOTO FERRADA

HABILITACIÓN PROFESIONAL
PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA.

CHILLÁN – CHILE

2026

EVALUACIÓN TÉCNICA DE UN ASPERSOR DE IMPACTO

Aprobado por:

Luis Octavio Lagos Roa
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesor Titular

Profesor Guía

Camilo Ignacio Souto Escalona
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

José Ricardo Hernán Contreras Urízar
Ingeniero Agrónomo.
Asesor Externo

Asesor Externo

José Luis Francisco Arumí Ribera
Ingeniero Civil, Ph.D.
Profesor Titular

Director de Departamento

Luis Octavio Lagos Roa
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesor Titular

Decano

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al Departamento de Recurso Hídricos, al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM) ANID/FONDAP/1523A0001 y al Consorcio Tecnológico del Agua (COTH2O) ANID/CTI/250001 por el financiamiento del equipamiento utilizado en este trabajo.

También, agradecer de corazón a todas las personas que me acompañaron durante estos años de estudio. A cada uno de los funcionarios de la Facultad de Ingeniería Agrícola, cuya buena disposición hizo más amena mi estadía en la universidad; a cada uno de los docentes, que no solo aportaron a mi formación académica, sino también a mi crecimiento personal, y a mis compañeros, que con el tiempo dejaron de ser solo compañeros para convertirse en grandes amigos.

Pero, sobre todo, agradezco profundamente a mi familia y amigos. Gracias por estar siempre, por apoyarme incluso cuando el camino se hizo difícil, por darme ánimo cuando faltaban fuerzas y por celebrar conmigo cada pequeño avance. En especial, a mi mamá, a mi polola y a mi hermano: ustedes han sido mis pilares, mi refugio y mi motivación constante. Este logro también es suyo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página
RESUMEN.....	1
SUMMARY	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS.....	9
2.1. Objetivo general.....	9
2.2. Objetivos específicos	9
3. ANTECEDENTES GENERALES	10
3.1. Aspersor evaluado	10
3.2. Sitio de estudio	12
4. METODOLOGÍA	14
4.1. Instalaciones en terreno.....	14
4.1.1. Aspersor.....	14
4.1.2. Pluviómetros	16
4.1.3. Caudal	17
4.2. Pruebas en terreno	18
4.2.1. Boquillas y presiones	18
4.2.2. Funcionamiento del aspersor.....	18
4.2.3. Tiempo de prueba y recolección de datos	19
4.2.4. Número de ensayos y velocidad del viento.....	20
4.2.5. Tiempos de llenado (caudal).....	21
4.3. Análisis de datos.....	21
4.3.1. Tasa de aplicación	21
4.3.2. Radio de alcance y diámetro efectivo	22
4.3.3. Marcos de aspersión y métricas de uniformidad	23
4.3.4. Simulación en R.....	25
4.3.5. Relación caudal-presión	30
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
5.1. Curvas radiales de la tasa de aplicación.....	31
5.1.1. Curvas por boquilla según presión.....	31
5.1.2. Curvas por presión según boquilla.....	36

5.2. Coeficientes de uniformidad, radio de alcance y diámetro efectivo	41
5.3. Relación caudal-presión	57
6. CONCLUSIONES	61
7. BIBLIOGRAFÍA	63
8. ANEXOS	67

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1.	Reducción del diámetro de humedecimiento en función de la velocidad del viento.....	23
Tabla 2.	Radios de alcance (R), velocidad de viento registrada (V), diámetros efectivos de humedecimiento (D) y espaciamientos recomendados ($0,6D \times 0,6D$ y $21/2R \times 21/2R$) según criterios indicados en la sección 3.5.3., para cada configuración presión-boquilla.....	56
Tabla 3.	Valores máximos y mínimos de uniformidad (CUC, CV y DUlq) para cada boquilla, según presión de operación y marco de aspersión.....	56
Tabla 4.	Caudal del aspersor extraído de su ficha técnica (SIME, s.f.) y obtenido de forma experimental (Q Ficha técnica y Q Experimental, respectivamente) según boquilla (principal y secundaria) y presión de operación utilizada, y porcentaje de aumento del caudal con respecto a lo registrado en la ficha técnica (Aumento de Q).....	60
Tabla 5.	Componentes del cabezal de riego.....	67
Tabla 6.	Caudal total (Q_{total}), caudal en boquilla principal (Q_{bprin}), caudal en boquilla secundaria (Q_{bsec}), pérdidas de carga en tramo de manguera Mallaflex utilizada en boquilla principal (H_f manguera bprin) y pérdidas de carga en tramo de manguera Mallaflex utilizada en boquilla secundaria (H_f manguera bsec), según cada configuración boquilla-presión implementada en el aforo del aspersor Duplex.....	74
Tabla 7.	Coefficiente de determinación (R^2) y error cuadrático medio (RMSE) obtenidos para los modelos spline monótono y polinómico en la modelación de las curvas de distribución radial del agua, para cada combinación de boquilla y presión de operación.....	132

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Componentes del aspersor marca SIME modelo Duplex.....	11
Figura 2. Boquillas intercambiables (14, 16, 18, 20 y 22 mm) y boquilla secundaria fija de 8 mm (líneas segmentadas amarillas).....	11
Figura 3. Mapa de localización del sitio de estudio, cuya ubicación geográfica se presente en coordenadas UTM (Datum WGS 84, Huso 18S).....	12
Figura 4. Cabezal de control. Bomba 1: VOGT modelo NM-629 MMS, acoplada a un motor WEG W22 tipo TE1BFOXO de 10 HP; Bomba 2: Reggio by Speroni modelo SN 32-200 C, de 5,5 HP y 2850 rpm, Bomba 3; Reggio by Speroni, modelo SSBJ 300 T, de 3 HP y 2850 rpm.....	13
Figura 5. Bosquejo de la matriz de aluminio 4" ubicada entre el cabezal de control y el aspersor Duplex.....	15
Figura 6. Conexión entre tubería principal de 4" y aspersor Duplex.....	15
Figura 7. Visualización en terreno de recipientes (cuadros celestes) distribuidos en cuatro hileras de 36 m de radio, compuestas de 36 individuos ubicados cada 1 m sobre hilera y uno ubicado en la base del aspersor.....	16
Figura 8. Aspersor con mangueras como extensión de las boquillas y recipiente de 220 L.....	17
Figura 9. Área de NO detención del sistema (polígono rojo).....	20
Figura 10. Representación gráfica de la construcción de los kernels radiales (función continua $g(x)$) mediante ajuste spline monótono (A) y ajuste polinómico (B).....	28

Figura 11. Representación esquemática del cálculo de la lámina de agua en un recipiente virtual a partir del aporte radial de un aspersor individual y de la superposición de aportes provenientes de un arreglo de 16 aspersores (4 x 4).....	29
Figura 12. Curvas radiales de tasa de aplicación por boquilla: 14 mm (A), 16 mm (B) y 18 mm (C), según presión de operación (2, 3 y 4 bar).....	35
Figura 13. Curvas radiales de tasa de aplicación por presión: 2 bar (A), 3 bar (B) y 4 bar (C), según boquilla (14, 16 y 18 mm).....	40
Figura 14. Coeficientes de uniformidad; Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), Coeficiente de Variación (CV) y Uniformidad de Distribución del Cuarto Menor (DUIq), con respecto a los marcos de aspersión simulados para cada una de las presiones evaluadas (2 ,3 y 4 bar) en la boquilla de 14 mm.....	44
Figura 15. Representación tridimensional de la superposición de las láminas de agua obtenidas mediante simulación para un conjunto de dieciséis emisores equipados con boquillas de 14 mm y presión de operación de 4 bar, dispuestos bajo el marco de aspersión de 30 x 30.....	45
Figura 16. Coeficientes de uniformidad; Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), Coeficiente de Variación (CV) y Uniformidad de Distribución del Cuarto Menor (DUIq), con respecto a los marcos de aspersión simulados para cada una de las presiones evaluadas (2 ,3 y 4 bar) en la boquilla de 16 mm.....	48
Figura 17. Representación tridimensional de la superposición de las láminas de agua obtenidas mediante simulación para un conjunto de dieciséis emisores equipados con boquillas de 16 mm y presión de operación de 3 bar, dispuestos bajo el marco de aspersión de 30 x 30.....	49

Figura 18. Coeficientes de uniformidad; Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), Coeficiente de Variación (CV) y Uniformidad de Distribución del Cuarto Menor (DUIq), con respecto a los marcos de aspersión simulados para cada una de las presiones evaluadas (2 ,3 y 4 bar) en la boquilla de 18 mm.....	53
Figura 19. Representación tridimensional de la superposición de las láminas de agua obtenidas mediante simulación para un conjunto de dieciséis emisores equipados con boquillas de 18 mm y presión de operación de 3 bar, dispuestos bajo el marco de aspersión de 30 x 30.....	54
Figura 20. Relación caudal-presión (Q y P, respectivamente) y ecuaciones de ajuste potencial según boquillas evaluadas (14, 16 y 18 mm).....	59
Figura 21. Esquema de puntos y líneas de flujo considerados en los balances de energía: Bernoulli 1 (B1) desde el manómetro hasta la boquilla principal (B2) y Bernoulli 1 (B1) desde el manómetro hasta la boquilla secundaria (B3).....	69

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Tasa de Aplicación.....	21
Ecuación 2. Coeficiente de uniformidad de Christiansen.....	24
Ecuación 3. Coeficiente de variación.....	24
Ecuación 4. Uniformidad de distribución del cuarto menor.....	24
Ecuación 5. Caudal.....	30
Ecuación 6. Pérdida de carga por fricción (Darcy–Weisbach).....	70
Ecuación 7. Ecuación implícita de Colebrook–White.....	71
Ecuación 8. Número de Reynolds	71
Ecuación 9. Factor de fricción de Darcy–Weisbach.....	71
Ecuación 10. Balance de energía de Bernoulli	72
Ecuación 11. Balance de energía de Bernoulli	72
Ecuación 12. Balance de masa	73

EVALUACIÓN TÉCNICA DE UN ASPERSOR DE IMPACTO

TECHNICAL EVALUATION OF AN IMPACT SPRINKLER

Palabras claves: Distribución radial, simulación hidráulica, uniformidad de riego, relación caudal–presión.

RESUMEN

El presente estudio evaluó el desempeño hidráulico del aspersor de impacto SIME Duplex 2" mediante ensayos experimentales y simulaciones orientadas a caracterizar la distribución radial de la lámina aplicada, la uniformidad de riego y la relación caudal–presión en tres boquillas (14, 16 y 18 mm) bajo distintas presiones de operación (2, 3 y 4 bar). Las curvas de tasa de aplicación permitieron identificar patrones de distribución mayoritariamente bimodales, siendo la presión de 3 bar la que generó los perfiles más estables y con mejores condiciones para la superposición de láminas. La evaluación de la uniformidad en los marcos de aspersion simulados evidenció que la boquilla de 18 mm operando a 3 bar en un espaciamiento de 30 x 30 m presentó el mejor desempeño. En general, los marcos más compactos (30 x 30 m y 30 x 36 m) fueron los que sistemáticamente alcanzaron las uniformidades más altas, a diferencia de las recomendaciones teóricas basadas en el radio de alcance y el diámetro efectivo. Por otra parte, los caudales experimentales se ajustaron adecuadamente a modelos potenciales ($R^2 > 0,94$) y fueron consistentemente superiores a los valores de catálogo, especialmente a bajas presiones, lo que refuerza la necesidad de evaluaciones específicas en

campo. En conjunto, los resultados permiten sugerir criterios operativos para la selección de boquillas, presiones y espaciamientos adecuados para este tipo de aspersor en sistemas de riego por aspersión de conjunto sólido.

TECHNICAL EVALUATION OF AN IMPACT SPRINKLER

Keywords: Radial distribution, hydraulic simulation, irrigation uniformity, flow–pressure relationship.

SUMMARY

This study evaluated the hydraulic performance of the SIME Duplex 2” impact sprinkler through experimental tests and simulations aimed at characterizing the radial distribution of applied water, irrigation uniformity, and the flow–pressure relationship for three nozzle sizes (14, 16, and 18 mm) under operating pressures of 2, 3, and 4 bar. The application rate curves revealed predominantly bimodal distribution patterns, with 3 bar producing the most stable profiles and providing the best conditions for water-depth overlap. The irrigation uniformity assessment in the simulated sprinkler spacings showed that the 18 mm nozzle operating at 3 bar in a 30 x 30 m layout delivered the best performance. Overall, the most compact spacings (30 x 30 m and 30 x 36 m) consistently achieved the highest uniformity values, contrasting with theoretical recommendations based on wetted radius and effective diameter. Additionally, the experimental flow rates fitted well to potential models ($R^2 > 0,94$) and were consistently higher than catalog values, particularly at lower pressures, reinforcing the need for field-specific hydraulic evaluations. Overall, the results provide operational guidelines for selecting suitable nozzles, pressures, and spacings for this type of sprinkler in solid-set irrigation systems.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura es una de las actividades más trascendentales para la humanidad, ya que, además de garantizar la producción de alimentos, incide de manera directa en el desarrollo económico, la estabilidad social y bienestar ambiental. Su relevancia radica en la capacidad de sustentar a una población mundial en constante crecimiento, generar empleo, impulsar la economía y enfrentar desafíos globales como el cambio climático y la escasez de recursos naturales. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, la producción mundial de alimentos deberá incrementarse en un 70 % para el año 2050, con el fin de abastecer adecuadamente a la población proyectada (FAO, 2009).

Por otra parte, la agricultura continúa siendo uno de los pilares fundamentales de la economía mundial. En 2022, aportó aproximadamente el 4,25 % al Producto Interno Bruto (PIB) mundial (Statista, 2025). Asimismo, cumple un rol social esencial, especialmente en las zonas rurales, donde constituye el sustento económico de millones de familias. Según datos de la FAO (2020), más del 27 % de la población mundial trabaja en este sector.

Desde una perspectiva ambiental, es importante considerar que la agricultura demanda cerca del 70 % del agua dulce disponible a nivel mundial (Banco Mundial, 2017). Esto sumado con las implicaciones experimentadas a raíz del cambio climático, han provocado importantes desafíos, especialmente en lo que respecta a la disponibilidad y el uso eficiente del recurso hídrico.

En el caso particular de Chile, el cambio climático ha tenido un impacto significativo, manifestándose a través de fenómenos como el aumento de las temperaturas, el incremento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor, la disminución de caudales y derretimiento de glaciares, los cuales en conjunto han ocasionado extensas sequías (MMA, 2021). Estas condiciones han provocado una escasez de agua cada vez más aguda, lo que representa una limitante crítica para el desarrollo sostenible de la agricultura en el país. Esta problemática ha obligado a replantear las estrategias de manejo del agua en la agricultura, impulsando la búsqueda de soluciones innovadoras para optimizar su uso.

Ante este escenario, se han promovido estrategias basadas en la eficiencia hídrica, que integran la digitalización de la gestión del agua y la adopción de tecnologías de riego avanzadas, como los sistemas de riego tecnificados, entre los cuales destacan el riego por aspersión y goteo. Estas prácticas no solo permiten hacer frente a la escasez hídrica, sino que también contribuyen a mejorar la productividad agrícola, al garantizar una aplicación más precisa y uniforme del agua, ajustándose a las necesidades específicas de cada cultivo o sistema de producción (Agnieszka, 2020).

Como resultado de estos esfuerzos, se ha evidenciado una transición progresiva en los sistemas de riego utilizados en el país. Hasta el año 2007, el riego superficial predominaba, abarcando el 72 % de la superficie total regada, mientras que el microrriego (o riego localizado) representaba el 23 %, seguido por el riego por aspersión que, apenas alcanzaba el 5 % (Martin & Saavedra,

2018). Sin embargo, catorce años después, según datos del Censo Agropecuario de 2021, se han producido cambios relevantes, aunque aún limitados. El riego por gravedad se mantuvo como el sistema mayoritario, pero su participación ha disminuido al 41 % de la superficie total, lo que refleja un avance hacia sistemas más eficientes. Por su parte, el riego localizado, creció hasta abarcar el 42 % de las superficies regadas, mientras que el riego por aspersión alcanzó un 17 %, es decir, más del triple respecto a 2007 (Colegio de Ingenieros de Chile A.G., 2022).

Si bien la superficie regada mediante sistemas de aspersión es menor en comparación con otros métodos, ello no implica que su relevancia sea menospreciada al momento de enfrentar la escasez hídrica.

Este tipo de riego permite distribuir el agua de manera controlada, simulando una lluvia ligera y uniforme, lo que contribuye a reducir las pérdidas por percolación profunda y escurrimiento superficial. Además, proporciona un mayor control sobre la cantidad y frecuencia del agua aplicada.

Asimismo, el riego por aspersión favorece la modernización del sector agrícola, al facilitar la integración de tecnologías complementarias, tales como el control automatizado del riego, la programación en función de las necesidades hídricas específicas de los cultivos y la incorporación de sensores que permiten un manejo de precisión del recurso hídrico.

No obstante, para que estos sistemas alcancen su máxima eficiencia, es indispensable considerar múltiples aspectos técnicos, ambientales y agronómicos. Algunos de estos pueden ser modificados mediante decisiones

de diseño, configuración o manejo del sistema, mientras que otros escapan del control humano. Entre los principales factores ajustables se incluyen el modelo del aspersor, la presión de trabajo, el diámetro de la boquilla, el espaciamiento y la disposición de los emisores en el terreno (ya sea en forma cuadrada, rectangular o triangular), así como del tipo de cultivo irrigado (Bandala et al., 2022; Prado, 2016).

Por otro lado, existen condiciones externas que no pueden ser controladas, como las variables climáticas, donde destacan la velocidad y dirección del viento, las cuales afectan negativamente la trayectoria de las gotas de agua, generando pérdidas por deriva y evaporación. A esto se suman las características topográficas de la superficie de trabajo, que también influyen en el desempeño del sistema (Stambouli et al., 2013; Bandala et al., 2022).

Frente a las múltiples variables que inciden en el rendimiento del riego por aspersión, resulta fundamental contar con metodologías de evaluación que permitan cuantificar su desempeño bajo condiciones reales de operación.

La evaluación de estos sistemas en campo, se enfoca principalmente en la uniformidad con que el agua se distribuye sobre la superficie del terreno. Una distribución uniforme es esencial para garantizar un uso eficiente del recurso hídrico y asegurar un riego adecuado en toda el área cultivada. Para este propósito, se han desarrollado diversos coeficientes de uniformidad, basados en ensayos experimentales que involucran pluviómetros ubicados estratégicamente en un área regada.

Uno de los índices más utilizados es el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), el cual se calcula a partir de las desviaciones absolutas con respecto a la media de las láminas recolectadas y refleja la variabilidad en la profundidad de riego (Maroufpoor et al., 2010).

Además del CUC, otros índices han sido propuestos para capturar distintos aspectos de la distribución del riego. Entre ellos se destacan el Coeficiente de Variación (CV), que expresa la desviación estándar como porcentaje de la media, y la Uniformidad de distribución del cuarto más bajo (DUIq), que considera el promedio del 25 % de las menores profundidades registradas (Elwadie et al., 2010).

Considerando estos antecedentes, evaluar el desempeño en terreno de los aspersores se vuelve un aspecto clave dentro de la gestión del riego tecnificado. Examinar en detalle parámetros como el caudal, la presión de trabajo, el radio de alcance, la tasa de aplicación y la uniformidad bajo diferentes condiciones operativas permite optimizar el diseño y manejo de los sistemas, promoviendo un uso racional del agua.

En este marco, el presente estudio se centra en la evaluación técnica del aspersor de impacto SIME Duplex 2". La investigación busca generar información práctica y confiable sobre su desempeño hidráulico, que contribuya al desarrollo de una agricultura más eficiente, resiliente y sustentable.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar técnicamente el aspersor de impacto SIME Duplex 2”.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar las curvas de tasa de aplicación del aspersor considerando tres boquillas (14, 16 y 18 mm) y tres presiones de operación (2, 3 y 4 bar).
- Evaluar la uniformidad de distribución del agua utilizando tres métricas (Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), Coeficiente de Variación (CV) y Uniformidad de Distribución del Cuarto menor (DUlq)) a partir de la simulación de siete configuraciones de espaciamiento entre aspersores (30 x 30 m, 36 x 36 m, 42 x 42 m, 48 x 48 m, 30 x 36 m, 36 x 42 m y 42 x 48 m).
- Obtener relación caudal-presión según diámetro de boquillas (14, 16 y 18 mm).

3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1. Aspersor evaluado

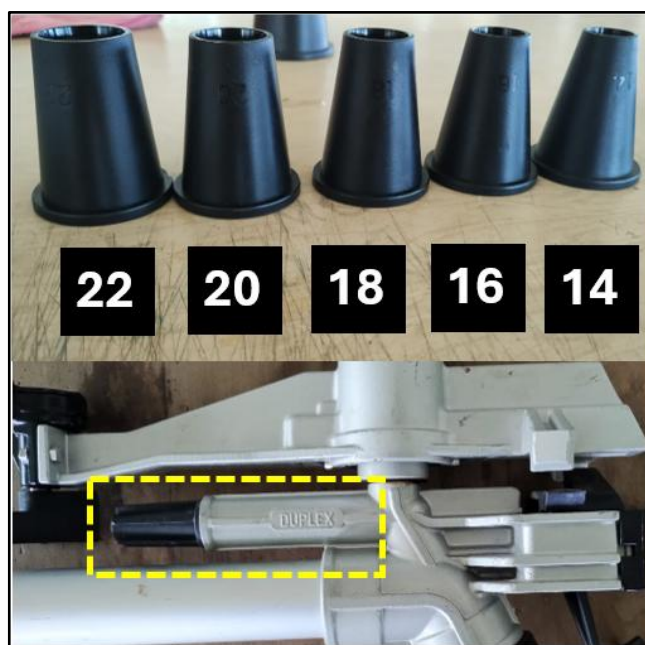
El aspersor en estudio corresponde al modelo Duplex fabricado por la empresa SIME. Este se cataloga como un aspersor de impacto de media capacidad, diseñado para operar en círculo completo o parcial. Este equipo cuenta con un retorno lento y un brazo oscilante accionado por la boquilla secundaria, además, posee un quebrachorro con regulación de penetración (Figura 1). La simplicidad mecánica del dispositivo y su estructura robusta y versátil lo hacen apto tanto para sistemas fijos como móviles, y adecuado para todo tipo de terrenos y cultivos.

Este modelo incorpora boquillas intercambiables de 12, 14, 16, 18, 20 y 22 mm de diámetro y una boquilla secundaria fija de 8 mm (Figura 2). El aspersor opera en un rango de presiones entre 2 y 6 bar, con caudales que oscilan entre 9,5 y 50,3 m³/h y un radio de alcance de entre 20 y 46,5 metros, dependiendo de la configuración de boquillas y la presión de trabajo. Su conexión es de tipo rosca hembra (2"), y su peso neto es de 3,3 kg (SIME, s.f.).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Componentes del aspersor marca SIME modelo Duplex.

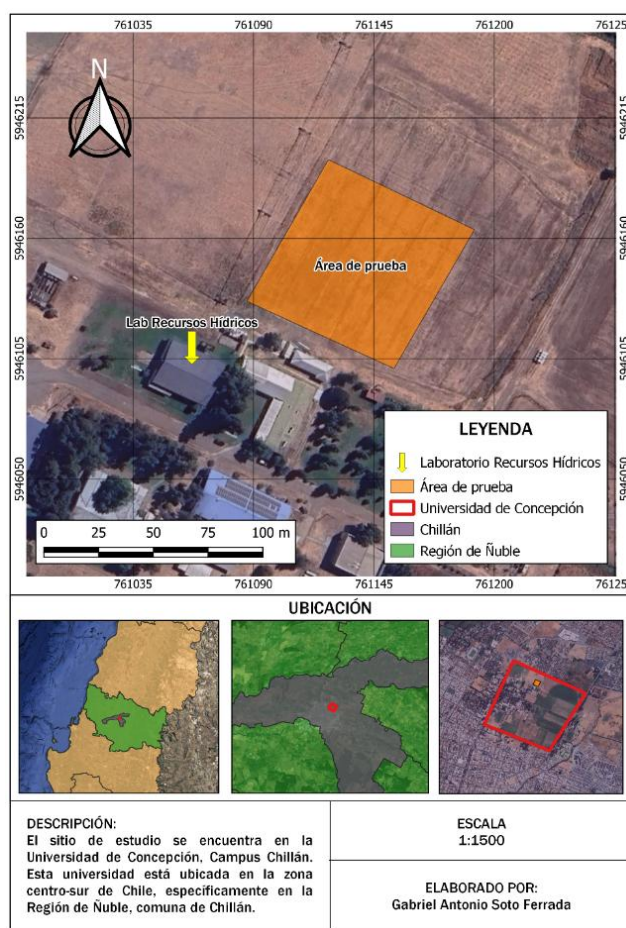


Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Boquillas intercambiables (14, 16, 18, 20 y 22 mm) y boquilla secundaria fija de 8 mm (líneas segmentadas amarillas).

3.2. Sitio de estudio

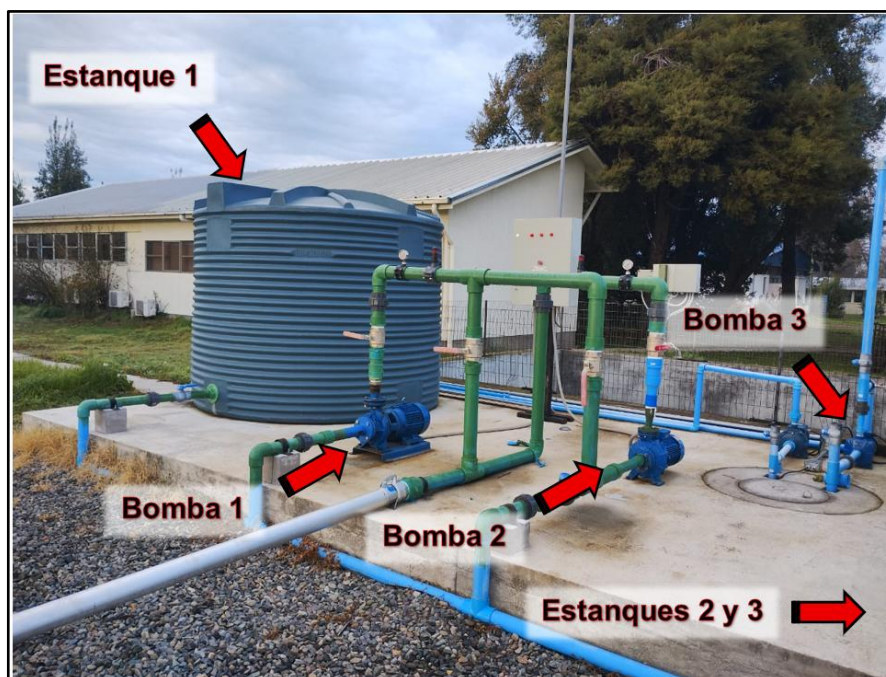
El estudio se llevó a cabo en la Universidad de Concepción, Campus Chillán. Dicho recinto se encuentra en la comuna de Chillán, Región de Ñuble, zona centro-sur de Chile. El experimento se realizó, específicamente, en una superficie al aire libre ubicada a pocos metros del Laboratorio de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola (Coordenadas UTM Datum WGS 84, Huso 18S, 761.138 m. Este, 5.946.148 m. Norte.) (Figura 3).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Mapa de localización del sitio de estudio, cuya ubicación geográfica se presente en coordenadas UTM (Datum WGS 84, Huso 18S).

El lugar especificado contó con los suministros necesarios para efectuar la evaluación técnica del aspersor de impacto, destacando el cabezal de control, compuesto, principalmente, por tres estanques de polietileno de 10 m³ cada uno y dos bombas conectadas en serie: la primera, marca VOGT modelo NM-629 MMS, acoplada a un motor WEG W22 tipo TE1BFOXO de 10 HP y 2900 rpm; y la segunda, marca Reggio by Speroni modelo SN 32-200 C, de 5,5 HP y 2850 rpm (el total de los componentes se especifican en la sección 7.1. de Anexos). Además, para la recarga de los estanques se dispuso de un pozo, cuyo volumen de agua es impulsado por una bomba marca Reggio by Speroni, modelo SSBJ 300 T, de 3 HP y 2850 rpm (Figura 4).



Fuente: Elaboración propia.

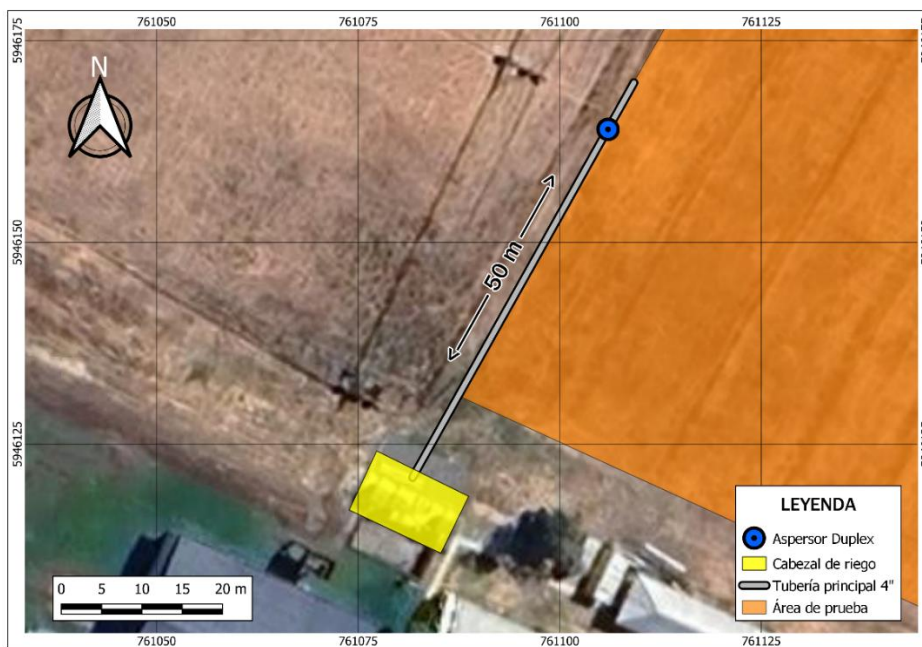
Figura 4. Cabezal de control. Bomba 1: VOGT modelo NM-629 MMS, acoplada a un motor WEG W22 tipo TE1BFOXO de 10 HP; Bomba 2: Reggio by Speroni modelo SN 32-200 C, de 5,5 HP y 2850 rpm, Bomba 3; Reggio by Speroni, modelo SSBJ 300 T, de 3 HP y 2850 rpm.

4. METODOLOGÍA

4.1. Instalaciones en terreno

4.1.1. Aspersor

El emisor se ubicó a 50 m del cabezal de control. La conexión entre estos se realizó a través de una matriz compuesta por 12 tuberías de aluminio de 4" (seis de 6 m y seis de 3 m de longitud nominal) marca RAESA y ensambladas en línea recta (Figura 5). La unión entre la tubería principal y el aspersor se compuso principalmente por: una tee reducción 4 x 2", una válvula de bola de 2" y un acople rápido de aluminio tipo hembra con rosca de 2", posicionando al emisor a 1 m de altura sobre el suelo. Además, en dicho acople se instaló un manómetro con el fin de monitorear la presión de trabajo del aspersor (Figura 6).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Bosquejo de la matriz de aluminio 4" ubicada entre el cabezal de control y el aspersor Duplex.

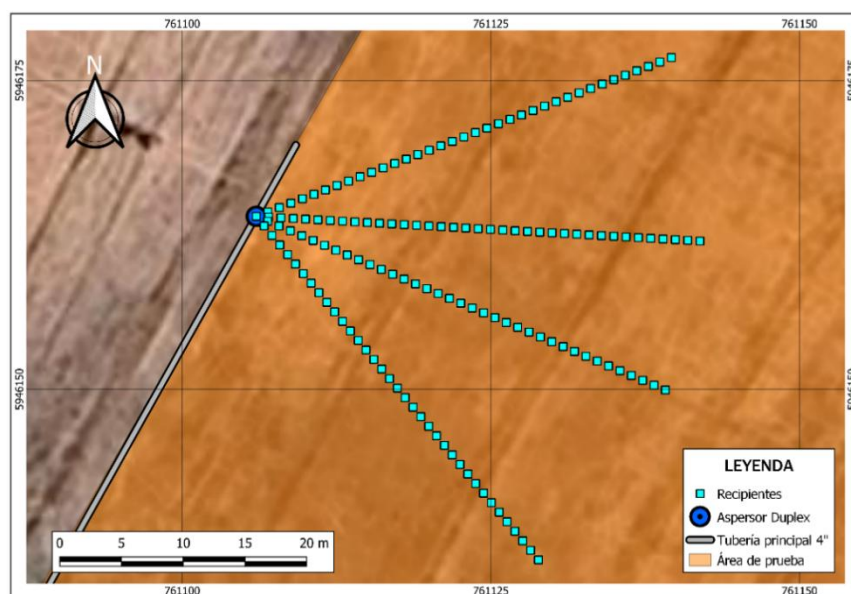


Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Conexión entre tubería principal de 4" y aspersor Duplex.

4.1.2. Pluviómetros

Se distribuyeron 145 estacas en el área de estudio como soporte para los recipientes o vasos recolectores, ubicando una junto del aspersor y las demás en 4 hileras. Cada hilera se compuso de 36 recipientes separados cada 1 m, completando un radio de 36 m desde el aspersor hasta el fin de estas (Figura 7). Las dimensiones de dichos acumuladores son: diámetro externo 11,5 cm, diámetro interno 11 cm y altura 14,2 cm.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Visualización en terreno de recipientes (cuadros celestes) distribuidos en cuatro hileras de 36 m de radio, compuestas de 36 individuos ubicados cada 1 m sobre hilera y uno ubicado en la base del aspersor.

4.1.3. Caudal

Se conectaron, manualmente, dos trozos de manguera (Mallaflex presión átoxica de 25 mm) de 1,35 m y 1,25 m de largo como extensión en las boquillas principal y secundaria respectivamente (el cálculo de las pérdidas de carga en ambos tramos se detalla en la sección 7.2. de Anexos), además, se utilizó un recipiente de 220 L para capturar el volumen de agua entregado por el emisor y un cronómetro, con el fin de medir los tiempos de llenado según las distintas presiones y boquillas estudiadas (Figura 8).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Aspersor con mangueras como extensión de las boquillas y recipiente de 220 L.

4.2. Pruebas en terreno

4.2.1. Boquillas y presiones

Las pruebas realizadas al aspersor Duplex se efectuaron utilizando tres boquillas; de 14, 16 y 18 mm (Figura 2). Para cada una de estas, se implementaron tres presiones de trabajo; 2, 3 y 4 bar. Las presiones establecidas en cada prueba fueron reguladas con válvulas de bola presentes a la salida de las bombas, es decir al inicio de los tramos de impulsión. Para la visualización y estabilización de estas, se contó con manómetros ubicados posterior a las válvulas de bola, en lo que corresponde al cabezal de control, y previo a la posición del aspersor (Figura 4 y Figura 6 respectivamente).

4.2.2. Funcionamiento del aspersor

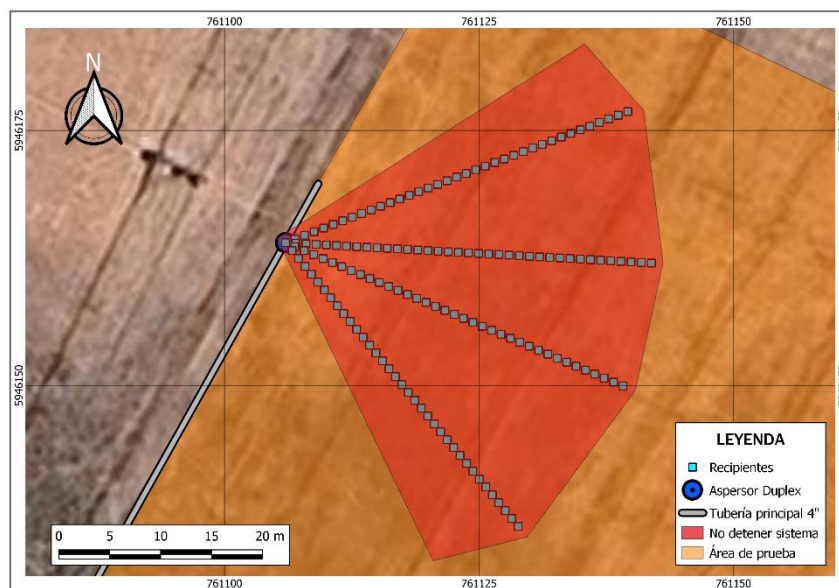
Por cada prueba, el procedimiento realizado para poner en marcha el aspersor, constó de las siguientes acciones: montaje de la boquilla, montaje del emisor en el sistema, apertura de válvula ubicada bajo este último, apertura de válvulas en el cabezal de control, encendido de bomba 1 y posteriormente encendido de bomba 2 (Figura 4), estabilización de la presión de trabajo y puesta en marcha del aspersor. Cabe destacar que el emisor se configuró para efectuar círculos completos.

Una vez finalizado el tiempo de prueba, el procedimiento realizado para detener el funcionamiento del aspersor constó de las siguientes acciones: apagado de bomba 2 y posteriormente apagado de bomba 1, cierre de válvulas del sistema.

4.2.3. Tiempo de prueba y recolección de datos

Una vez puesto en marcha el aspersor, se inició el cronometraje del tiempo de prueba, el cual fue de aproximadamente 40 min, con ligeras variaciones según el ensayo. Este tiempo se definió en función de la disponibilidad de agua en el sistema para el máximo caudal del aspersor, considerando las distintas configuraciones de boquillas y presión utilizadas. Un tiempo mayor al establecido excedía el gasto con respecto al volumen de agua disponible, invalidando el ensayo por interrupción del suministro. Al cumplirse el tiempo previsto, se detuvo el funcionamiento del sistema, tal como se indica en la sección 3.4.2. Es importante mencionar que, si al momento de finalizar el tiempo de evaluación el chorro del aspersor se encontraba sobre las hileras (recipientes), se esperaba a que saliera de esa zona antes de detener el sistema (Figura 9).

Luego de la detención del sistema, se recolectaron y midieron los volúmenes de agua capturados en los recipientes. Para ello se dispuso de probetas graduadas de plástico de 250 mL, con resolución de 0,2 mL. El procedimiento consistió en trasvasijar el agua desde el recipiente a la probeta, registrando el valor medido en una planilla Excel. La recolección se realizó desde el centro (aspersor) hacia la periferia, recorriendo cada una de las hileras por separado. Esta secuencia fue homóloga para las distintas pruebas realizadas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Área de NO detención del sistema (polígono rojo).

4.2.4. Número de ensayos y velocidad del viento

Se realizaron nueve ensayos utilizando distintas combinaciones de boquillas y presiones; es decir, se efectuó una prueba por cada combinación asignada de presión y boquilla. Dado que los experimentos se realizaron al aire libre, estos se llevaron a cabo bajo un rango de velocidades de viento entre 0,5 y 2,3 m s⁻¹. Previo al inicio de los ensayos, se consultó el pronóstico de viento en el sitio Web Windfinder (2025), observando las predicciones alusivas a la estación meteorológica del Aeródromo General Bernardo O'Higgins (Chillán). No obstante, para una mayor precisión en relación con el sitio de estudio, tras la ejecución de las pruebas, se recurría a los registros de la estación meteorológica de la Dirección General de Aguas (DGA), ubicada en el campus

Chillán de la Universidad de Concepción, accediendo a través del Sistema Nacional de Información de Aguas (SNIA) disponible en línea (DGA, 2025).

4.2.5. Tiempos de llenado (caudal)

De acuerdo con lo indicado en la sección 3.3.3., para cada boquilla (14, 16 y 18 mm) se midió el tiempo de llenado del recipiente bajo las distintas presiones de trabajo (2, 3 y 4 bar). Este procedimiento se repitió tres veces por cada presión en cada una de las boquillas.

4.3. Análisis de datos

4.3.1. Tasa de aplicación

La tasa de aplicación de agua se define como la lámina que precipita sobre una superficie por unidad de tiempo (Ge et al., 2019). Para cada uno de los nueve ensayos realizados con distintas combinaciones de boquilla y presión, esta tasa se estimó de forma radial, promediando los volúmenes de agua captados por los recipientes ubicados a la misma distancia del aspersor en los cuatro radios, con el fin de obtener una curva de distribución radial para cada configuración boquilla–presión (Qureshi et al., 2023). El cálculo se efectuó en Excel mediante la Ecuación 1.

$$Ta_i = \frac{V_{prom,i}}{A \cdot t \cdot 1000} \quad [1]$$

donde:

Ta_i : Tasa de aplicación de agua a una distancia i del aspersor (mm h^{-1}).

$V_{prom,i}$: Volumen promedio de agua recolectado en cuatro recipientes ubicados a la distancia i del aspersor (mL).

A : Área transversal del recipiente (m^2).

t : Tiempo de riego o duración de la aplicación (h).

4.3.2. Radio de alcance y diámetro efectivo

El radio de alcance húmedo del aspersor se definió como la distancia desde el emisor (aspersor) hasta el recipiente más lejano que registrara una tasa de aplicación igual o superior a $0,25 \text{ mm h}^{-1}$ (César et al., 2004). A partir de este valor, el diámetro de humedecimiento se calculó como el doble del radio.

Dado que el viento influye significativamente en la distribución del agua, se estimó un diámetro de humedecimiento efectivo ajustando el valor original.

Según lo propuesto por Keller y Bliesner (1990), para velocidades de viento entre 0 y 5 km h^{-1} (0 a $1,4 \text{ m s}^{-1}$), se recomienda aplicar una reducción del 10% respecto al diámetro calculado. En casos donde la velocidad del viento supera los 5 km h^{-1} , se sugiere una disminución adicional del $2,5 \%$ por cada $1,6 \text{ km h}^{-1}$ excedente, conforme se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Reducción del diámetro de humedecimiento en función de la velocidad del viento.

Velocidad del viento (km h ⁻¹)	Velocidad del viento (m s ⁻¹)	Reducción del diámetro (%)
[0, 5]	[0, 1,4]	10
(5, 6,6]	(1,4, 1,8]	12,5
(6,6, 8,2]	(1,8, 2,3]	15
(8,2, 9,8]	(2,3, 2,7]	17,5
(9,8, 11,3]	(2,7, 3,1]	20

Fuente: Elaboración propia según lo propuesto por Keller y Bliesner (1990).

4.3.3. Marcos de aspersión y métricas de uniformidad

El espaciamiento entre aspersores desempeña un papel clave en el diseño de los sistemas de riego por aspersión, ya que incide directamente en la uniformidad de aplicación del agua. Según lo señalado por Jara y Holzapfel (s.f.), en configuraciones de marco cuadrado o rectangular se recomienda que la distancia entre aspersores sea equivalente a $2^{1/2}$ del radio de alcance bajo velocidades de viento menores a 4 km h⁻¹, mientras que, para velocidades mayores a esta (hasta 8 km h⁻¹), se sugiere que el espaciamiento entre los emisores sea igual al 60 % del diámetro efectivo del aspersor. Tomando en cuenta estas recomendaciones, se generaron siete configuraciones de marcos de aspersión para cada combinación de boquilla y presión. Los marcos generados fueron: 30 x 30 m; 36 x 36 m; 42 x 42 m; 48 x 48 m; 30 x 36 m; 36 x 42 m; 42 x 48 m.

Posteriormente, se evaluó la uniformidad de aplicación del agua en cada marco de aspersión, mediante tres métricas: Coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC), Coeficiente de Variación (CV) y Uniformidad de

Distribución del Cuarto más Bajo (DU_{lq}), considerando las distintas combinaciones de boquillas y presiones. La estimación se realizó a partir de las ecuaciones 2, 3 y 4 (Jiang et al., 2020; El-Wahed et al., 2016).

$$CUC = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n \cdot \bar{x}} \right] \cdot 100 \quad [2]$$

donde:

CUC: Coeficiente de uniformidad de Christiansen (%).

x_i : Lámina de agua recolectada en el i -ésimo recipiente colector (mm).

\bar{x} : Lámina media de agua recolectada en todos los recipientes (mm).

n : Número total de recipientes.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad [3]$$

donde:

CV: Coeficiente de variación (%).

σ : Desviación estándar de las láminas de agua recolectadas (mm).

\bar{x} : Lámina media de agua recolectada en todos los recipientes (mm).

$$DU_{lq} = \frac{\bar{x}_{25}}{\bar{x}} \cdot 100 \quad [4]$$

donde:

DU_{lq}: Uniformidad de distribución del cuarto menor (%).

\bar{x}_{25} : Lámina promedio de agua correspondiente al 25 % de los recipientes con menor acumulación (mm).

\bar{x} : Lámina media de agua recolectada en todos los recipientes (mm).

Es importante destacar que, los valores ideales para estas métricas de uniformidad, aunque complejos de obtener, son: cercanos al 100 % en el caso de CUC y DUlq, y cercanos a 0 para CV.

4.3.4. Simulación en R

Dado que los ensayos en terreno se realizaron con un único aspersor, debido a la disponibilidad limitada de equipos, la evaluación de la uniformidad de aplicación del agua se efectuó mediante simulaciones computacionales en el entorno de programación R. Para ello, se desarrolló un script específico (presentado en la sección 7.3 de Anexos) que permitió transformar los perfiles radiales medidos experimentalmente en funciones continuas de aplicación y proyectar la superposición de láminas bajo distintas configuraciones espaciales, correspondientes a los marcos de aspersión evaluados.

El procedimiento metodológico se estructuró en tres etapas principales: (i) procesamiento y estandarización de los datos experimentales, (ii) construcción del kernel radial de aplicación del aspersor y (iii) simulación de la superposición de láminas y cálculo de métricas de uniformidad.

En una primera etapa, se realizó la lectura, limpieza y estandarización de los datos experimentales desde una hoja de cálculo Excel. A partir de esta base de datos se seleccionó, de forma controlada, una combinación específica de boquilla y presión de operación, la cual fue posteriormente utilizada para las simulaciones correspondientes a cada marco de aspersión.

En la segunda etapa se construyó el kernel radial de aplicación, definido como una función continua $g(r)$ que describe la tasa de aplicación del aspersor en función de la distancia radial al emisor. Para este propósito se implementaron dos enfoques alternativos de ajuste: un modelo spline monótono y un modelo polinómico. En ambos casos, la función ajustada se definió sobre el dominio efectivo del aspersor y se complementó con una función de atenuación suave (taper) en el tramo final del radio de alcance, con el objetivo de asegurar continuidad y evitar discontinuidades abruptas en el borde del área mojada. De esta forma, la función final $g(r)$ se definió de manera seccional como:

$$g(r) = \begin{cases} f(r), & 0 < r < 0,95 \cdot r_{\text{máx}} \\ f(r) \cdot \text{taper}(r), & 0,95 \cdot r_{\text{máx}} < r < r_{\text{máx}} \\ 0, & r \geq r_{\text{máx}} \end{cases}$$

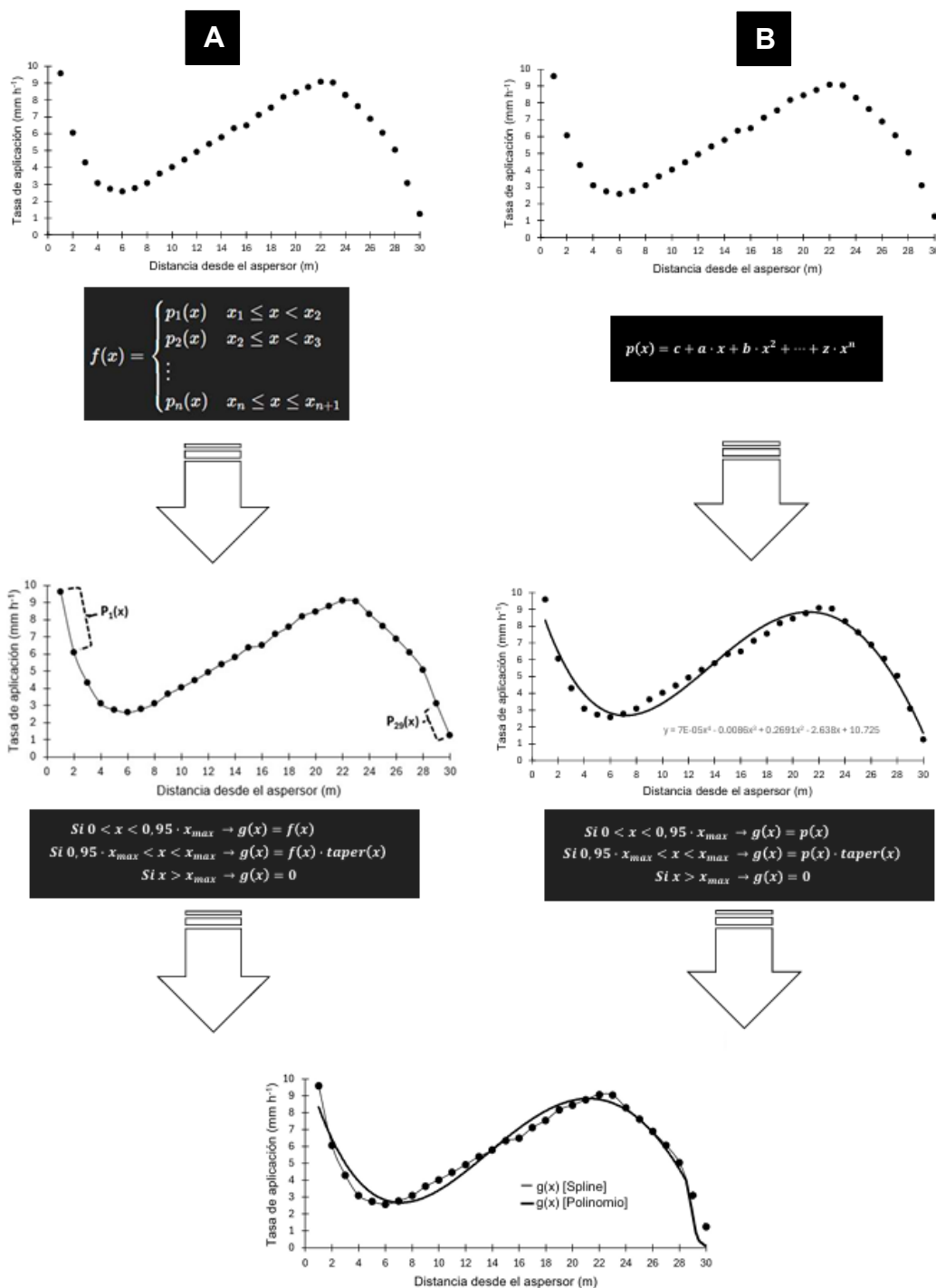
donde $r_{\text{máx}}$ corresponde al radio máximo efectivo del aspersor (Figura 10).

Para cada método, la calidad del ajuste se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE), los cuales permitieron comparar objetivamente el desempeño de los métodos empleados.

En la tercera etapa se llevó a cabo la simulación de la superposición de láminas de riego. Para ello, considerando el marco de aspersión especificado, se definió una grilla regular de recipientes virtuales con resolución espacial de 0,5 m. En torno a esta grilla se proyectó un arreglo de dieciséis aspersores (4 x 4), cuyas posiciones se definieron en función del espaciamiento del marco evaluado. Para cada recipiente virtual, se calculó la distancia radial a cada uno de los emisores del arreglo y se evaluó la función kernel correspondiente,

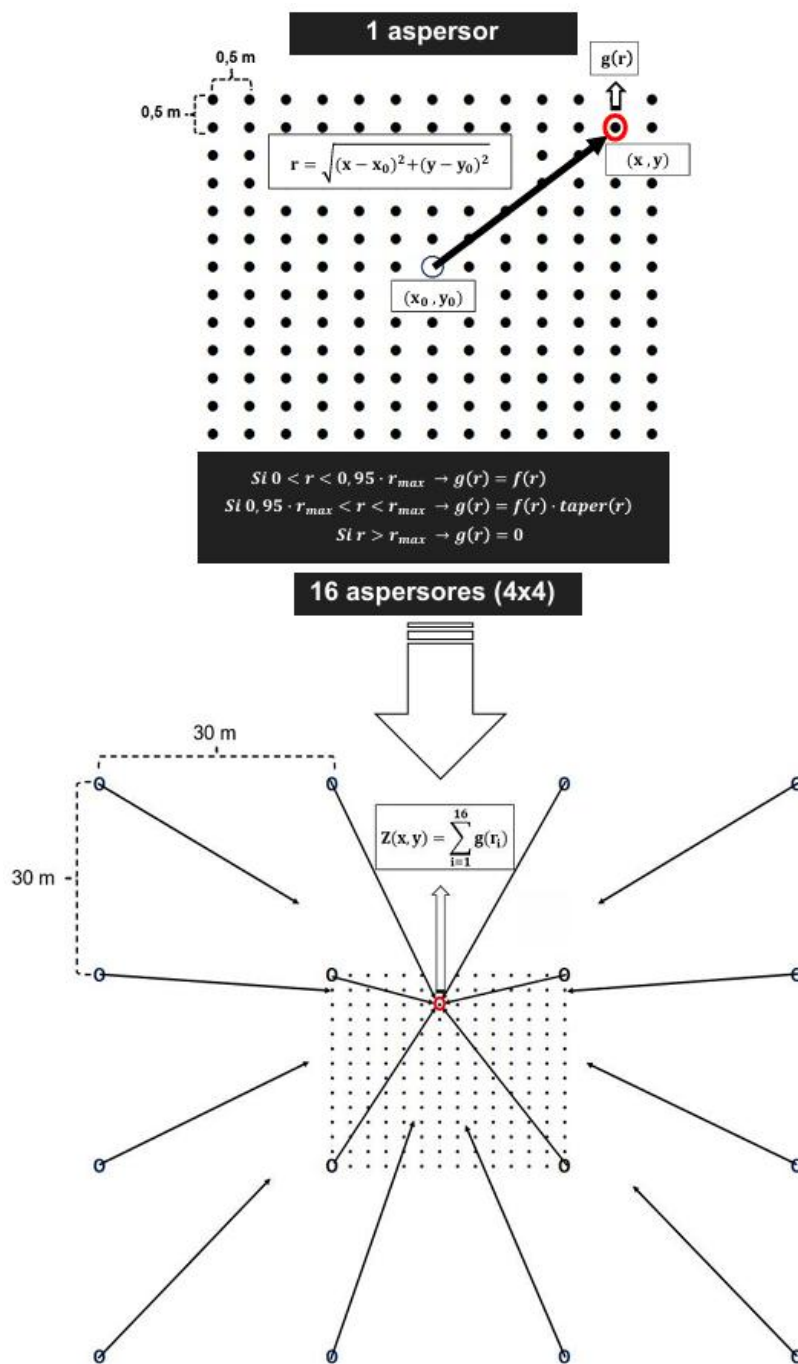
obteniéndose el aporte individual de cada aspersor. La lámina acumulada en cada punto se determinó como la suma de los aportes provenientes de los dieciséis emisores, permitiendo representar explícitamente el proceso de superposición espacial de la precipitación (Figura 11).

Finalmente, a partir de la distribución espacial de la lámina acumulada se calcularon las métricas de uniformidad de riego (CUC, CV y DUlq) para cada método de kernel considerado. Adicionalmente, se generaron mapas tridimensionales de la distribución de precipitación, los cuales facilitaron la visualización espacial de los patrones de aplicación resultantes y la identificación de zonas de mayor y menor aporte hídrico dentro del marco evaluado.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Representación gráfica de la construcción de los kernels radiales (función continua g(x)) mediante ajuste spline monótono (A) y ajuste polinómico (B).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Representación esquemática del cálculo de la lámina de agua en un recipiente virtual a partir del aporte radial de un aspersor individual y de la superposición de aportes provenientes de un arreglo de 16 aspersores (4 x 4).

4.3.5. Relación caudal-presión

Tras registrar los tiempos de llenado según cada configuración de boquilla y presión (sección 3.4.5.), se calculó el promedio de los valores obtenidos en cada ensayo. A partir de este, se estimó el caudal por cada configuración (Ecuación 5), permitiendo así determinar la relación caudal-presión y obtener, en cada caso, una ecuación de ajuste potencial con el fin de representar la sensibilidad del caudal respecto a la variación de presión. Cabe señalar que dicho procedimiento se realizó a través de la herramienta computacional Excel.

$$Q = \frac{V_r}{t_p} \quad [5]$$

Q: Caudal del aspersor ($L s^{-1}$).

V_r : Volumen del recipiente (L).

t_p : Tiempo promedio de llenado (s).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Curvas radiales de la tasa de aplicación

5.1.1. Curvas por boquilla según presión

Las curvas radiales de la tasa de aplicación para la boquilla de 14 mm (Figura 12 (A)) mostraron que, en general, las mayores tasas se alcanzaron a 4 bar, excepto en el tramo intermedio del alcance (aproximadamente 16 a 24 m), donde la curva a 3 bar superó a la de 4 bar y presentó un pico más alto. Las tres curvas tuvieron una forma similar, con dos máximos definidos: uno próximo al aspersor y otro hacia la zona media o final del alcance. Entre ambos se observó un valle en el perfil radial, donde las tasas disminuyeron de manera significativa. El valor máximo se registró a 1 m del aspersor, con $12,1 \text{ mm h}^{-1}$ a 4 bar, mientras que el mínimo intermedio (previo al segundo pico) fue de $2,6 \text{ mm h}^{-1}$ a 2 bar. Al aumentar la presión de trabajo también creció el radio de alcance, alcanzando 30, 34 y 36 m para 2, 3 y 4 bar, respectivamente. Las velocidades de viento durante los ensayos fueron de 1,2; 1,1 y $0,5 \text{ m s}^{-1}$ para 2, 3 y 4 bar, valores que no evidenciaron una influencia apreciable del viento en la distribución de la boquilla de 14 mm.

En el gráfico (B) de la Figura 12, que corresponde a la boquilla de 16 mm, se observa que la distribución con menor variación ocurrió a 4 bar, seguida por 3 bar, que también mostró un comportamiento estable en el tramo intermedio (13 a 24 m). Cabe señalar que, las curvas radiales de la boquilla de 16 mm presentaron, al igual que las de 14 mm, un patrón bimodal en las tres presiones

evaluadas. En la zona próxima al aspersor (0 a 2 m), las tasas iniciales fueron similares entre curvas, con valores cercanos a 10 y 10,5 mm h⁻¹. Posteriormente, se produjo un descenso entre los 6 y 8 m, donde se registraron los mínimos valores de cada presión, seguido de un segundo máximo. Este se observó a 18 m con un valor de 12,1 mm h⁻¹ a 2 bar, siendo el punto con mayor tasa de aplicación. En contraste, las curvas de 3 y 4 bar mostraron un segundo pico menos agudo, pero más extendido entre 16 y 22 m, manteniendo tasas relativamente altas durante una mayor distancia. En la periferia del alcance, la curva de 2 bar descendió de forma más abrupta, mientras que a 3 y 4 bar la disminución fue más progresiva, con radios de 33, 36 y 35 m para 2, 3 y 4 bar, respectivamente. A diferencia de la boquilla de 14 mm, el mayor alcance se obtuvo a 3 bar, coincidiendo con la menor velocidad de viento registrada en ese ensayo (1,5; 0,9 y 1,1 m s⁻¹ para 2, 3 y 4 bar, respectivamente).

De la sección (C) de la Figura 12 se aprecia que las curvas radiales correspondientes a la boquilla de 18 mm mostraron un comportamiento más irregular entre presiones, en comparación con las boquillas de 14 y 16 mm. En el tramo cercano al aspersor (0 a 2 m), las tres presiones registraron valores iniciales similares (9 a 12 mm h⁻¹). Luego, todas descendieron entre 4 y 8 m, configurando la depresión más prolongada del perfil radial, con un mínimo de 3,5 mm h⁻¹ a 2 bar. Se detectó además un punto anómalo en la curva de 3 bar a los 6 m, posiblemente asociado a un error puntual de medición. El segundo ápice se registró a los 20 m, con un valor de 14,5 mm h⁻¹ a 4 bar, la tasa más

alta observada en este conjunto de ensayos. En cambio, las curvas de 2 y 3 bar presentaron un segundo máximo menos pronunciado, pero más extendido, lo que generó una distribución más estable entre 13 y 27 m, especialmente a 3 bar, condición que evidenció la mayor uniformidad relativa en este rango. En la periferia (>28 m), las curvas de 2 y 4 bar descendieron bruscamente, mientras que la de 3 bar mantuvo tasas moderadas hasta el final. Los radios máximos fueron de 32, 36 y 36 m para 2, 3 y 4 bar, respectivamente. La tasa de aplicación en el límite de 36 m a 3 bar superó ampliamente el criterio establecido en la sección 3.5.2. ($\geq 0,25 \text{ mm h}^{-1}$), lo que sugiere que el radio real de alcance en esa condición fue mayor, aunque no pudo confirmarse por la limitación en el número de recipientes (36 por hilera). Finalmente, se destaca que a 36 m la tasa fue mayor a 3 bar que a 4 bar, comportamiento que coincide con la mayor velocidad de viento registrada durante los ensayos a 4 bar ($2,3 \text{ m s}^{-1}$, en comparación con $1,1 \text{ m s}^{-1}$ a 2 y 3 bar), lo que contribuye a explicar la mayor irregularidad observada en la periferia de la curva radial a 4 bar.

En conjunto, las tres boquillas evaluadas (14, 16 y 18 mm) mostraron distribuciones radiales con dos máximos definidos, aunque con diferencias en su intensidad, extensión y regularidad. La boquilla de 14 mm presentó un patrón radial estable entre las distintas presiones, con máximos marcados tanto al inicio como en el tramo intermedio, alcanzando su mayor uniformidad y alcance a 4 bar. La boquilla de 16 mm exhibió un comportamiento similar, pero con un segundo pico más extendido y estable a 3 y 4 bar, lo que se tradujo

en una distribución más uniforme, siendo destacable que el mayor alcance se obtuvo a 3 bar, en coincidencia con menores velocidades de viento. En contraste, la boquilla de 18 mm mostró mayor irregularidad entre presiones, con un segundo pico muy pronunciado a 4 bar y distribuciones más estables a 3 bar, condición en que también se observó la mayor uniformidad en el rango intermedio del perfil y una tasa final ampliamente superior al criterio de alcance establecido. Asimismo, en esta boquilla la influencia del viento fue más notoria, ya que la mayor velocidad registrada a 4 bar concordó con una mayor irregularidad en la periferia.

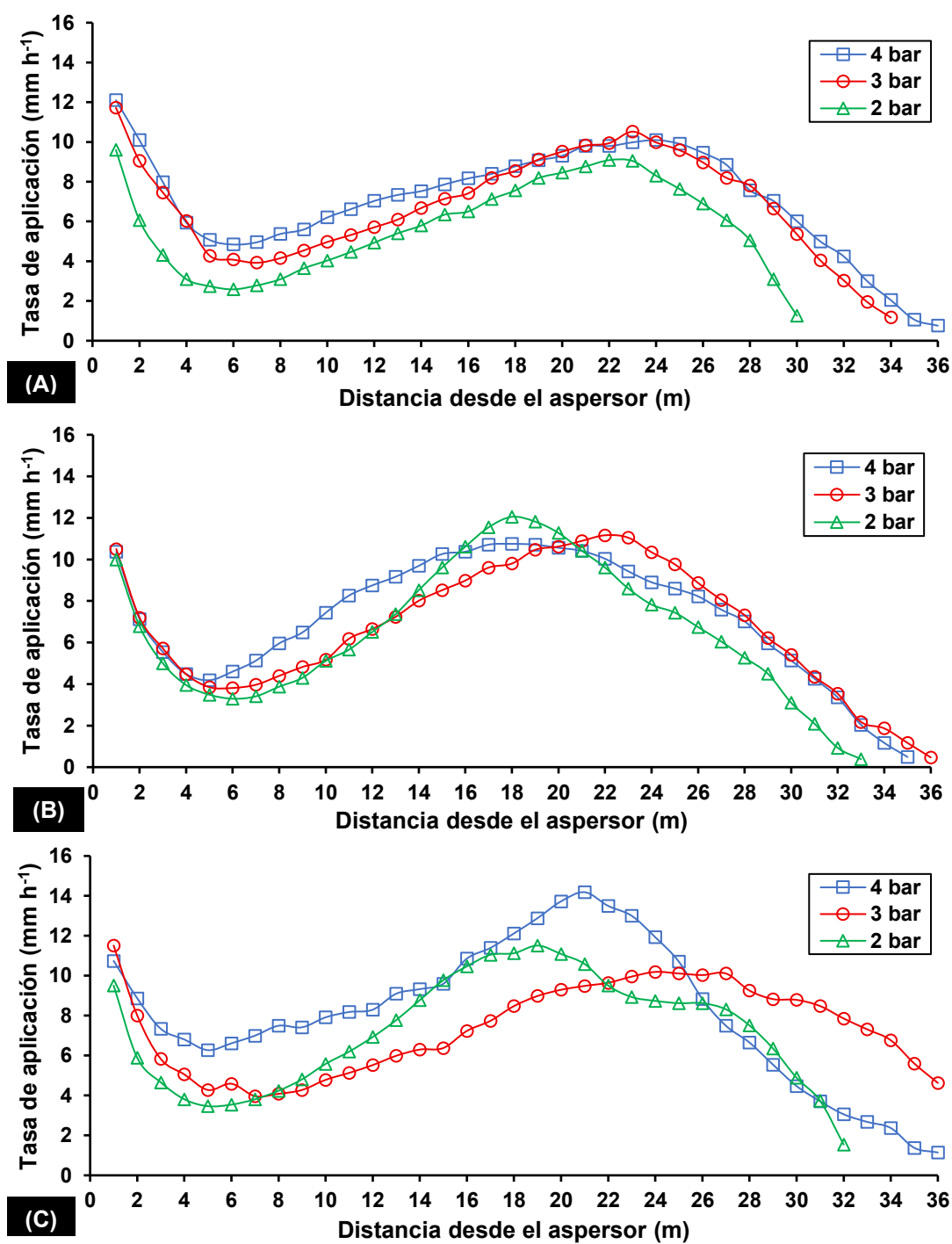


Figura 12. Curvas radiales de tasa de aplicación por boquilla: 14 mm (A), 16 mm (B) y 18 mm (C), según presión de operación (2, 3 y 4 bar).

5.1.2. Curvas por presión según boquilla

En la Figura 13 (A), correspondiente a las curvas radiales de la tasa de aplicación a 2 bar, se observa que las tres boquillas inician con tasas similares, en torno a 10 mm h^{-1} , aunque la de 18 mm se ubicó levemente por debajo de las de 14 y 16 mm. Entre 4 y 8 m se presentó una depresión común en todas las curvas, más acentuada en la boquilla de 14 mm, que alcanzó el mínimo valor ($2,6 \text{ mm h}^{-1}$), mientras que las de 16 y 18 mm se mantuvieron por encima de este. El segundo máximo se registró a 18 m con $12,1 \text{ mm h}^{-1}$ en la boquilla de 16 mm, siendo el mayor valor del conjunto, aunque la de 18 mm alcanzó un valor muy cercano ($11,8 \text{ mm h}^{-1}$). En contraste, la boquilla de 14 mm mantuvo tasas inferiores en casi todo el perfil radial. En el tramo final (23 a 33 m), la de 18 mm destacó con la mayor aplicación de agua, seguida por la de 16 mm, que mostró una disminución progresiva, mientras que la de 14 mm presentó el descenso más abrupto. Los radios de alcance fueron de 30, 33 y 32 m para las boquillas de 14, 16 y 18 mm, respectivamente, con un patrón en el que la de 16 mm se extendió ligeramente más que la de 18 mm, aunque con tasas menores en la periferia. Las velocidades de viento medidas ($1,2$; $1,5$ y $1,1 \text{ m s}^{-1}$ para 14, 16 y 18 mm, respectivamente) fueron bajas y no evidenciaron influencia significativa en las tendencias observadas.

De la Figura 13 (B), correspondiente a las curvas a 3 bar, las tres boquillas mostraron un patrón similar hasta los 24 m de alcance, diferenciándose principalmente en la magnitud de las tasas más que en la forma de las curvas.

En el tramo inicial (0 a 6 m), la boquilla de 14 mm presentó las mayores tasas (máximo de $11,7 \text{ mm h}^{-1}$), mientras que la de 16 mm registró los valores más bajos, con un mínimo de $3,8 \text{ mm h}^{-1}$. Todas coincidieron en un valle entre 5 y 7 m, con tasas mínimas entre $3,8$ y $4,6 \text{ mm h}^{-1}$, menos pronunciado que el observado a 2 bar. Se detectó además un punto anómalo en la curva de 18 mm a los 6 m, posiblemente asociado a un error puntual de medición. En el tramo intermedio (8 a 24 m), la boquilla de 16 mm alcanzó las mayores tasas, con un segundo pico de $11,2 \text{ mm h}^{-1}$, mientras que las de 14 y 18 mm se mantuvieron próximas, por debajo de esta. Las boquillas de 14 y 16 mm mostraron picos más agudos, en tanto que la de 18 mm presentó un perfil más extendido y estable en la meseta intermedia. En la periferia (25 a 36 m), la boquilla de 18 mm se destacó al mantener tasas notablemente superiores, especialmente después de los 28 m, mientras que las de 14 y 16 mm descendieron de forma más abrupta. Los radios de alcance fueron de 34, 36 y 36 m para 14, 16 y 18 mm, respectivamente. En el caso de la boquilla de 18 mm, como se señaló en la sección 4.1.1, la tasa de aplicación al límite de 36 m superó ampliamente el criterio mínimo de $0,25 \text{ mm h}^{-1}$, lo que sugiere que su alcance efectivo fue mayor, aunque no se pudo corroborar debido a la limitación en el número de recipientes. Las velocidades de viento registradas fueron de $1,1$; $0,9$ y $1,1 \text{ m s}^{-1}$ para 14, 16 y 18 mm, respectivamente, valores bajos que no parecen haber influido en los patrones observados.

En el gráfico (C) de la Figura 13, correspondiente a la presión de 4 bar, se evidenciaron diferencias claras en el comportamiento radial de las tres boquillas. En general, las de 14 y 16 mm mostraron ascensos y descensos más uniformes y progresivos, mientras que la de 18 mm presentó un perfil más abrupto. En el tramo inicial (0 a 2 m), las tasas oscilaron entre 10,4 y 12,1 mm h⁻¹, destacando la boquilla de 14 mm con el valor más alto y la de 16 mm con el más bajo. Todas las curvas presentaron una depresión entre 4 y 6 m, donde la de 18 mm se mantuvo sobre 6,3 mm h⁻¹, mientras que la de 16 mm alcanzó el mínimo con 4,2 mm h⁻¹. En el tramo intermedio (16 a 22 m) se registraron los segundos máximos en posiciones distintas: la boquilla de 18 mm alcanzó el valor más alto, con 14,2 mm h⁻¹ a los 21 m, con un pico agudo, a diferencia de las de 14 y 16 mm, que alcanzaron valores menores (10,1 y 10,7 mm h⁻¹, respectivamente) pero con cimas más amplias y estables. En la periferia (≥ 27 m), las tres curvas descendieron abruptamente, aunque la boquilla de 14 mm mantuvo tasas superiores en gran parte del descenso. Los radios de alcance fueron de 36, 35 y 36 m para las boquillas de 14, 16 y 18 mm, respectivamente, siendo la de 16 mm, la única que redujo su cobertura. La mayor velocidad de viento registrada correspondió a la boquilla de 18 mm (2,3 m s⁻¹, frente a 0,5 y 1,1 m s⁻¹ para 14 y 16 mm), lo que coincidió con una menor uniformidad en su perfil radial.

Al comparar las tres presiones, se observa que a 2 bar las curvas presentaron menor uniformidad y mayores diferencias entre boquillas, con la de 14 mm

rezagada y las de 16 y 18 mm mostrando las mayores tasas y coberturas. A 3 bar se alcanzó la condición más equilibrada, ya que las tres boquillas compartieron un patrón radial semejante hasta los 24 m, diferenciándose solo en la magnitud: la de 16 mm destacó en el tramo intermedio y la de 18 mm en la periferia. Finalmente, a 4 bar las diferencias se acentuaron: las boquillas de 14 y 16 mm mantuvieron perfiles regulares y consistentes, mientras que la de 18 mm alcanzó el valor máximo absoluto, pero con menor uniformidad radial, comportamiento asociado a la mayor velocidad de viento registrada en su ensayo.

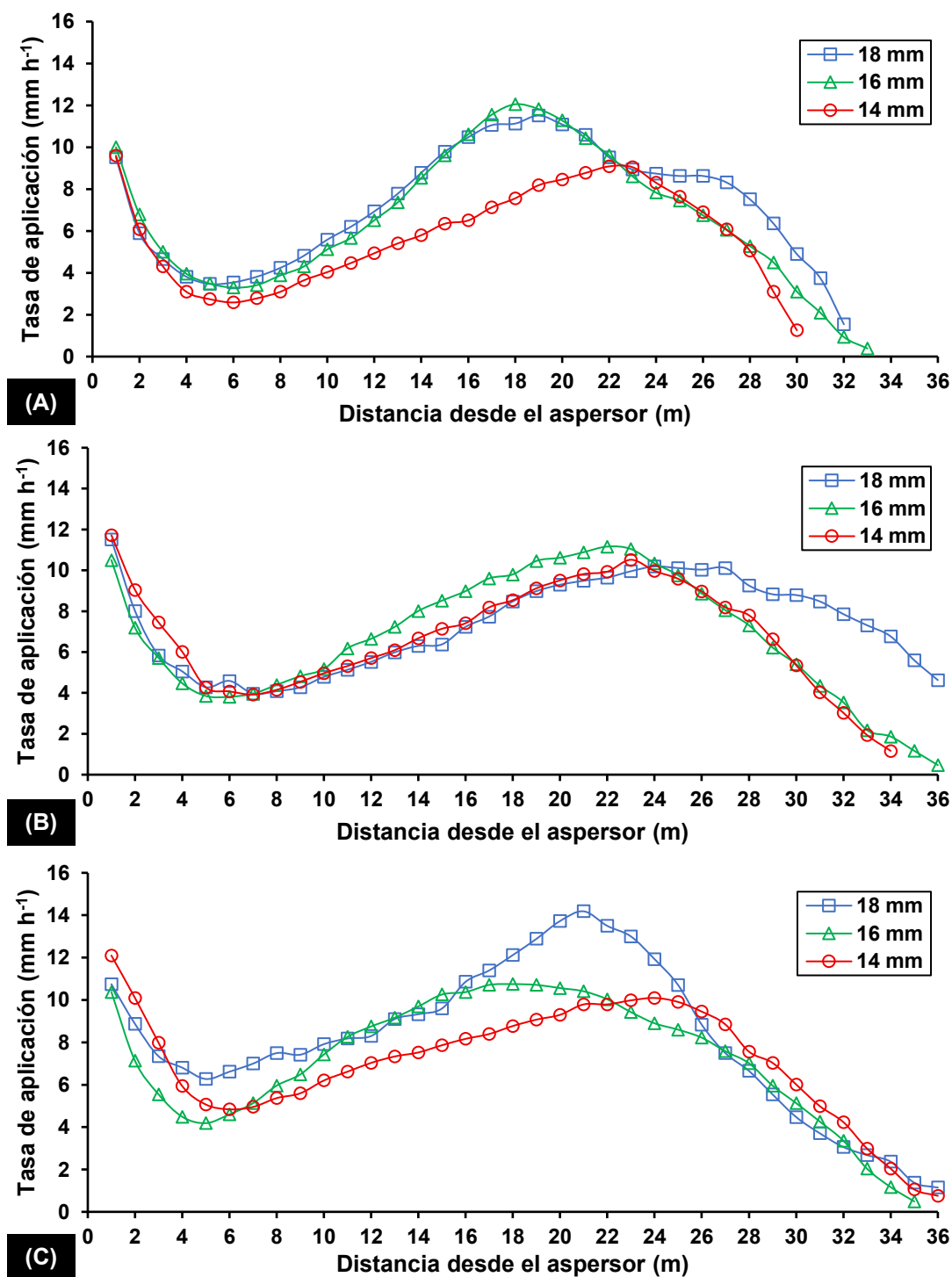


Figura 13. Curvas radiales de tasa de aplicación por presión: 2 bar (A), 3 bar (B) y 4 bar (C), según boquilla (14, 16 y 18 mm).

5.2. Coeficientes de uniformidad, radio de alcance y diámetro efectivo

Dado que, en la modelación de las curvas de distribución de agua, las métricas de ajuste evidenciaron que el modelo spline monótono presentó, en todas las combinaciones de boquilla y presión evaluadas, valores de R^2 superiores y errores RMSE menores en comparación con el modelo polinómico (valores presentados en la sección 7.4 de Anexos), los resultados de simulación de láminas acumuladas y de las métricas de uniformidad se presentan exclusivamente a partir de kernels spline.

De acuerdo con Qureshi et al. (2023), el CUC debe superar el 75 % en sistemas de riego por aspersión fijo. En complemento, se consideraron los criterios de evaluación propuestos por Corrales J. (2011), quien clasifica el CUC como excelente cuando supera el 90 %, bueno entre 80 y 90 %, regular entre 70 y 80 % y pobre si es inferior al 70 %; mientras que DUlq se considera excelente por sobre 85 %, buena entre 80 y 85 %, regular entre 75 y 80 % y pobre por debajo del 70 %. Los resultados obtenidos por El-Wahed et al. (2016) en estudios similares respaldan estos rangos de referencia, al reportar valores entre 78 y 91 % para CUC, 10 y 25 % para el coeficiente de variación (CV) y 71 y 85 % para la uniformidad de distribución mínima (DUlq). Estos antecedentes proporcionan un marco comparativo sólido para la interpretación de los resultados del presente estudio.

De la Figura 14, se puede observar que, al utilizar la boquilla de 14 mm con una presión de trabajo de 2 bar, todos los espaciamentos simulados (marcos de aspersión) presentaron valores de uniformidad clasificados como regulares

a pobres según los rangos de referencia antes mencionados, con CUC entre 53 % y 70 % y DUIq entre 33 % y 63 %, lo que indica una distribución deficiente del agua. Esta baja uniformidad concuerda con las curvas radiales descritas en la Figura 12 (A), donde a 2 bar se registró el menor alcance (30 m) y las tasas de aplicación más bajas en la periferia. La Tabla 2 confirma este comportamiento, mostrando un diámetro efectivo (D) de 54 m y una velocidad de viento de $1,2 \text{ m s}^{-1}$, factores que explican la pérdida de continuidad en la superposición de láminas y la consiguiente reducción de la uniformidad.

Al aumentar la presión a 3 bar, la uniformidad del riego mejoró significativamente, alcanzando valores de CUC = 81 % y DUIq = 76 % en el marco de 30 x 30 m, con un CV de 22 %, situándose ambos coeficientes dentro de la categoría buena según lo expuesto por la literatura. Esta mejora se relaciona con la mayor estabilidad observada en las curvas radiales (Figura 12 (A)), donde el patrón bimodal se mantuvo, pero con una transición más suave entre máximos y mínimos, evidenciando una distribución más equilibrada del agua. De acuerdo con la Tabla 2, el radio de alcance aumentó a 34 m y el diámetro efectivo a 61 m, lo que amplió el área de humedecimiento, favorecido además por una menor velocidad de viento ($1,1 \text{ m s}^{-1}$), colaborando en el incremento de la uniformidad del riego.

Finalmente, a 4 bar, los valores de uniformidad aumentaron de forma considerable respecto a 2 bar, destacando nuevamente los marcos de 30 x 30 m y 36 x 36 m, con CUC = 87 % y DUIq = 85 %, los más altos de toda la serie,

catalogándose dentro de la categoría buena a excelente. La reducción del CV (15 %) indica una baja dispersión de las tasas de aplicación, lo cual concuerda con la curva radial 4 bar, donde se observó la mayor tasa máxima (12,1 mm h⁻¹) y el radio de alcance más amplio (36 m, según Tabla 2), bajo condiciones de viento muy bajas (0,5 m s⁻¹).

En conjunto, los resultados indican que la boquilla de 14 mm alcanza su mejor desempeño hidráulico a 4 bar, condición en la que los valores de CUC y DUlq se sitúan dentro de los rangos reportados en la literatura. Esta condición se caracteriza por un incremento del diámetro efectivo (de 54 a 65 m) lo que se traduce en un mayor aprovechamiento del patrón de riego. Como refuerzo del análisis, se destaca la configuración con los valores más altos de uniformidad, obtenida en el marco de aspersión de 30 x 30 m, cuyo patrón de superposición de láminas se representa en la Figura 15. En dicha visualización tridimensional se observa una distribución homogénea de la lámina acumulada en el área central del marco de aspersión, sin concentraciones excesivas ni zonas de déficit marcadas, lo que concuerda directamente con los elevados valores de CUC y DUlq obtenidos y confirma el buen desempeño hidráulico del marco de 30 x 30 m con boquilla de 14 mm operando a 4 bar.

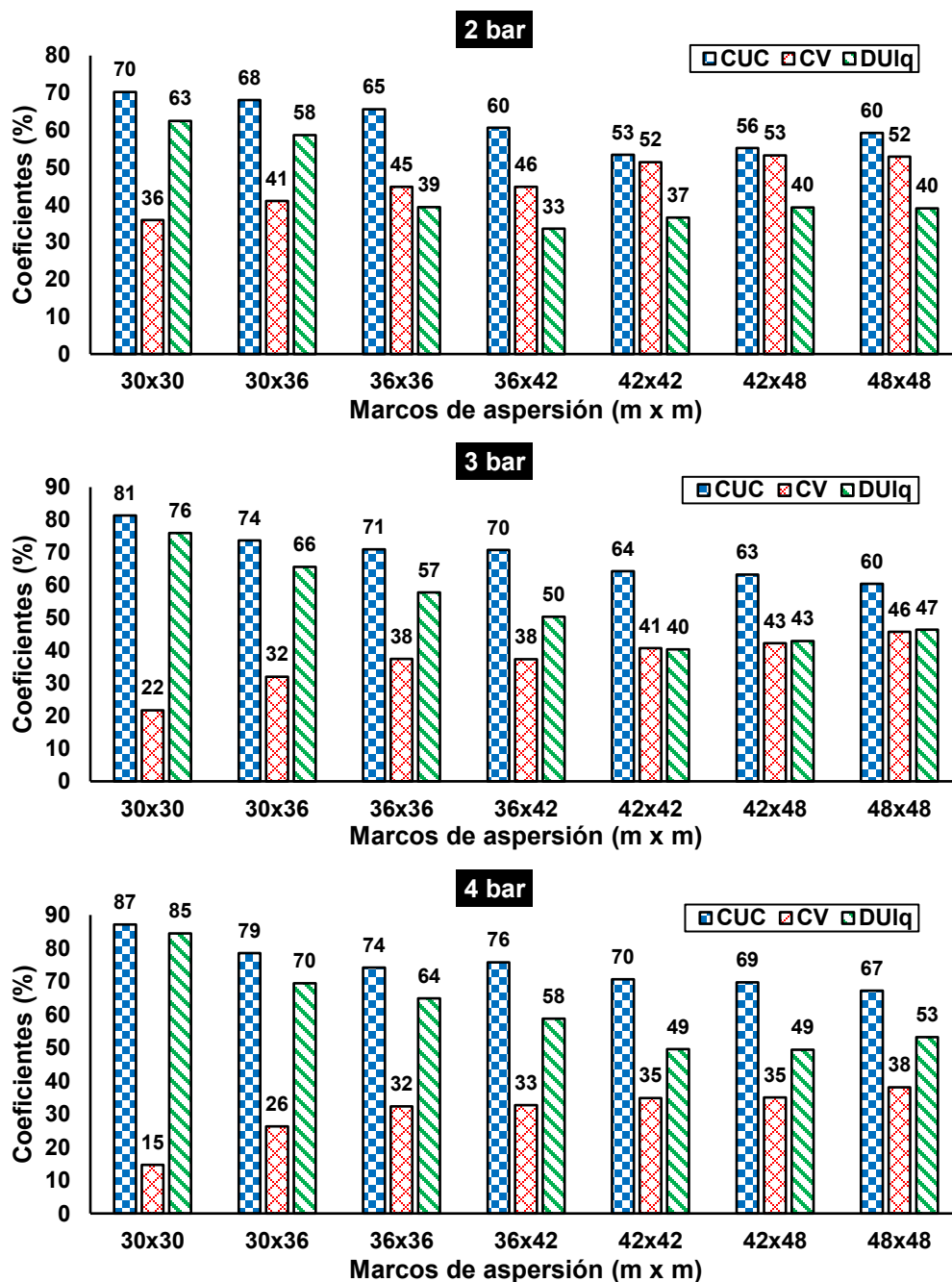


Figura 14. Coeficientes de uniformidad; Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), Coeficiente de Variación (CV) y Uniformidad de Distribución del Cuarto Menor (DUlq), con respecto a los marcos de aspersión simulados para cada una de las presiones evaluadas (2 ,3 y 4 bar) en la boquilla de 14 mm.

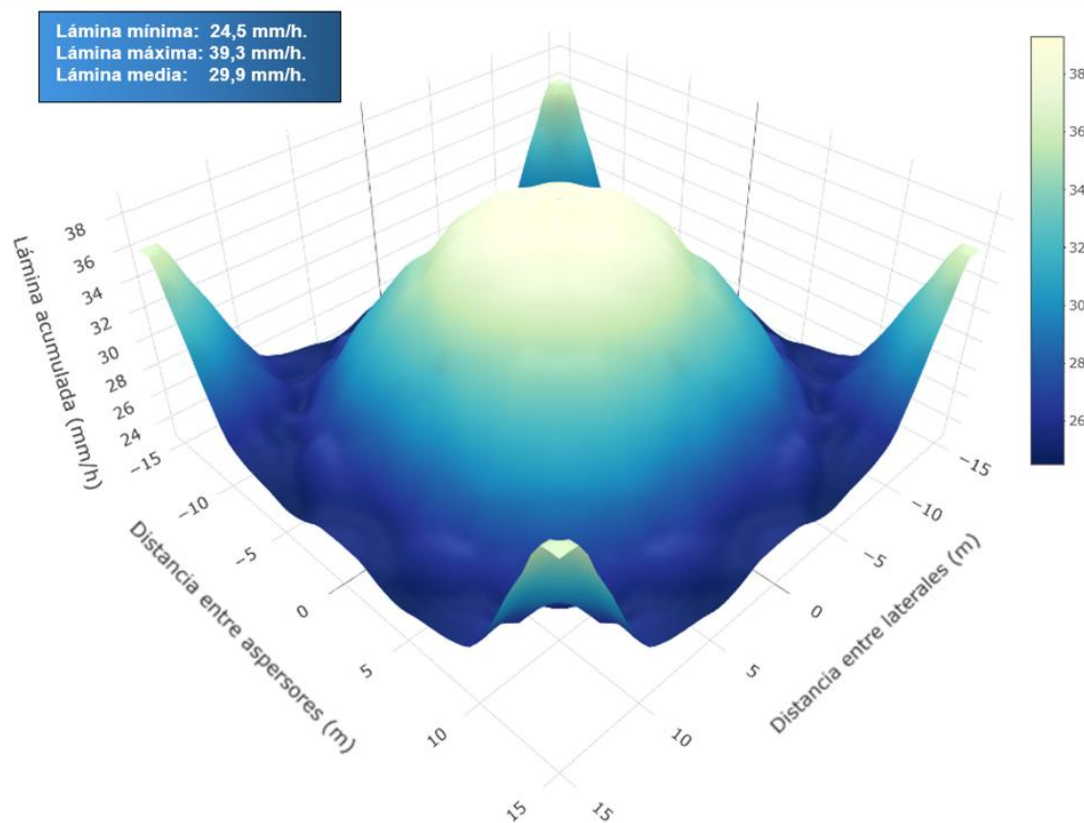


Figura 15. Representaci3n tridimensional de la superposici3n de las láminas de agua obtenidas mediante simulaci3n para un conjunto de dieciseis emisores equipados con boquillas de 14 mm y presi3n de operaci3n de 4 bar, dispuestos bajo el marco de aspersi3n de 30 x 30 m.

En la Figura 16, correspondiente a la boquilla de 16 mm, se observa que a una presi3n de 2 bar los valores de uniformidad se clasifican como regulares a pobres segun los criterios de Corrales J. (2011). Los valores de CUC se situaron entre 63 % y 73 %, mientras que la DUI_q vari3 entre 37 % y 68 %, evidenciando una distribuci3n heterogénea del agua en la mayoría de los marcos de aspersi3n. El CV, con valores comprendidos entre 31 % y 43 %,

reflejó una alta variabilidad en la lámina aplicada, especialmente en marcos amplios ($\geq 36 \times 42$ m). Este comportamiento concuerda con las curvas radiales presentadas para esta boquilla en la Figura 12 (B), donde a 2 bar se observó una depresión intermedia pronunciada y una disminución abrupta hacia la periferia del alcance (33 m según Tabla 2), lo que redujo la superposición efectiva de las láminas y, por consiguiente, la uniformidad global del riego.

Con el aumento de la presión a 3 bar, se registró una mejora en los tres coeficientes. Los valores de CUC alcanzaron hasta 84 % en el marco 30×30 m, mientras que la DUlq llegó a 81 %, acompañada de un CV mínimo de 19 %, correspondiendo a una buena uniformidad. Este escenario representó una condición de aplicación más homogénea y estable. Dichos resultados concuerdan con el incremento del radio de alcance a 36 m y la reducción de la velocidad del viento ($0,9 \text{ m s}^{-1}$, Tabla 2), factores que favorecen una superposición más regular de las láminas. Asimismo, el patrón radial observado en la Figura 12 (B) a esta presión muestra un segundo máximo amplio y sostenido entre 16 y 22 m, lo que contribuyó al alza en los valores de uniformidad simulados.

En la condición de 4 bar, los coeficientes CUC y DUlq se mantuvieron en niveles moderados, aunque sin incrementos significativos respecto a 3 bar. Los valores de CUC fluctuaron entre 71 % y 83 %, y los de DUlq entre 48 % y 78 %, mientras que el CV disminuyó ligeramente (19–34 %). Este comportamiento evidenció una leve pérdida de uniformidad DUlq en el marco 30×30 m respecto de lo obtenido a 3 bar, atribuible al menor radio de alcance

del chorro y a la mayor velocidad del viento ($1,1 \text{ m s}^{-1}$, Tabla 2) experimentada a esta presión, lo que generó una distribución menos consistente en la periferia. Pese a ello, los valores obtenidos permanecen dentro de los rangos considerados buenos y son coherentes con los reportados por la literatura internacional para sistemas de aspersión de media capacidad.

En conjunto, los resultados de la Figura 16 demuestran que la boquilla de 16 mm alcanza su mejor desempeño hidráulico a 3 bar (marco 30 x 30 m), sin embargo, a nivel global, a 4 bar se presentaron los mejores valores de uniformidad, condición en la que los coeficientes de uniformidad se mantienen dentro o por debajo de los rangos reportados por El-Wahed et al. (2016). De manera complementaria, la Figura 17 ilustra la representación tridimensional de la superposición de láminas correspondiente al marco 30 x 30 m a 3 bar, condición en la que se obtuvieron los valores máximos de uniformidad para esta boquilla. En dicha visualización se aprecia una superficie de lámina acumulada relativamente homogénea en la zona central del marco, aunque con una mayor variación espacial y presencia de áreas con menor lámina aplicada hacia los bordes, en comparación con lo observado en la Figura 15. Esta diferencia refleja una superposición menos uniforme que la obtenida para la boquilla de 14 mm a 4 bar, coherente con los menores valores de CUC y DUI_q alcanzados por la boquilla de 16 mm, aun bajo su condición óptima de operación (3 bar).

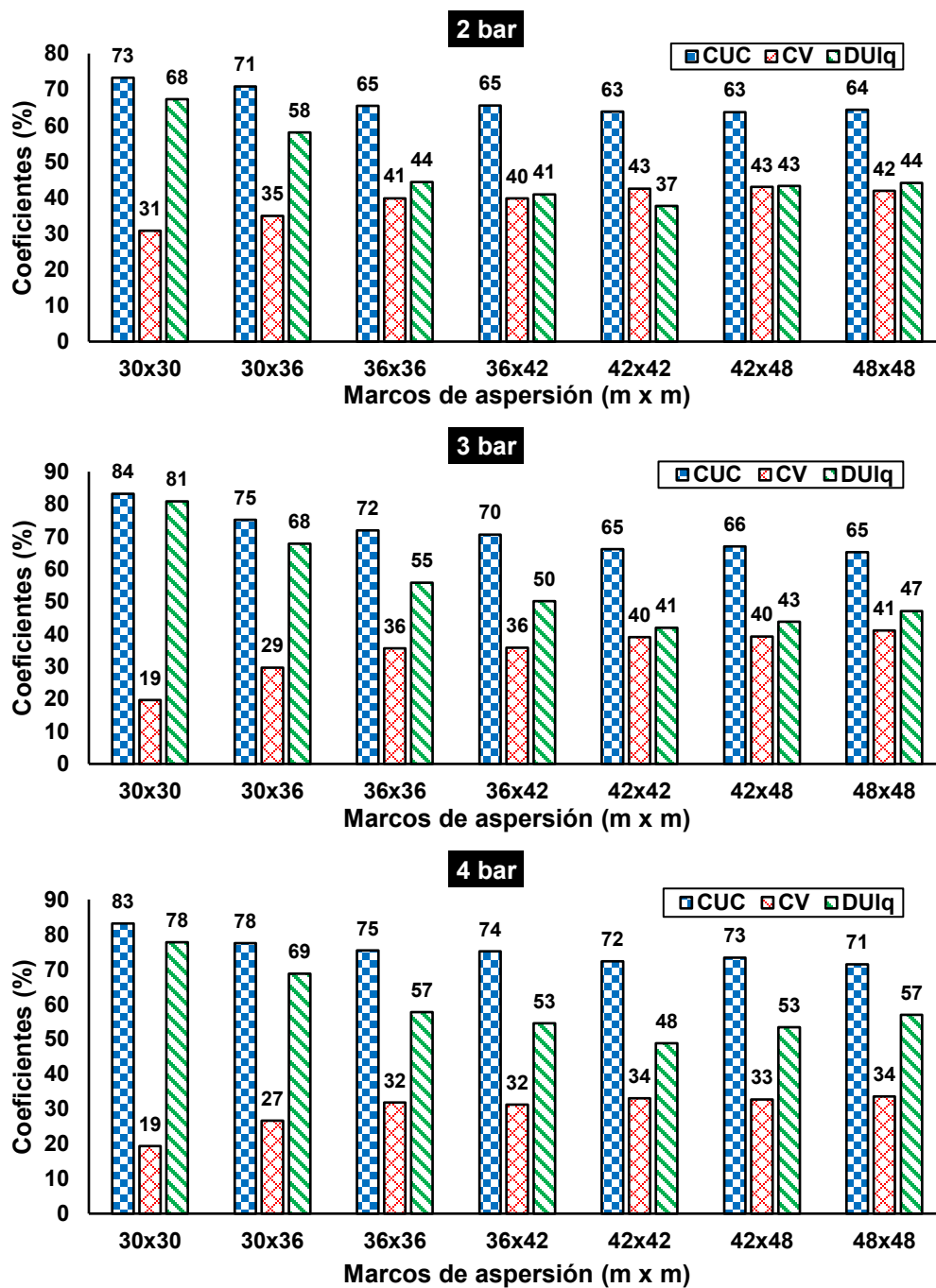


Figura 16. Coeficientes de uniformidad; Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), Coeficiente de Variación (CV) y Uniformidad de Distribución del Cuarto Menor (DULq), con respecto a los marcos de aspersión simulados para cada una de las presiones evaluadas (2, 3 y 4 bar) en la boquilla de 16 mm.

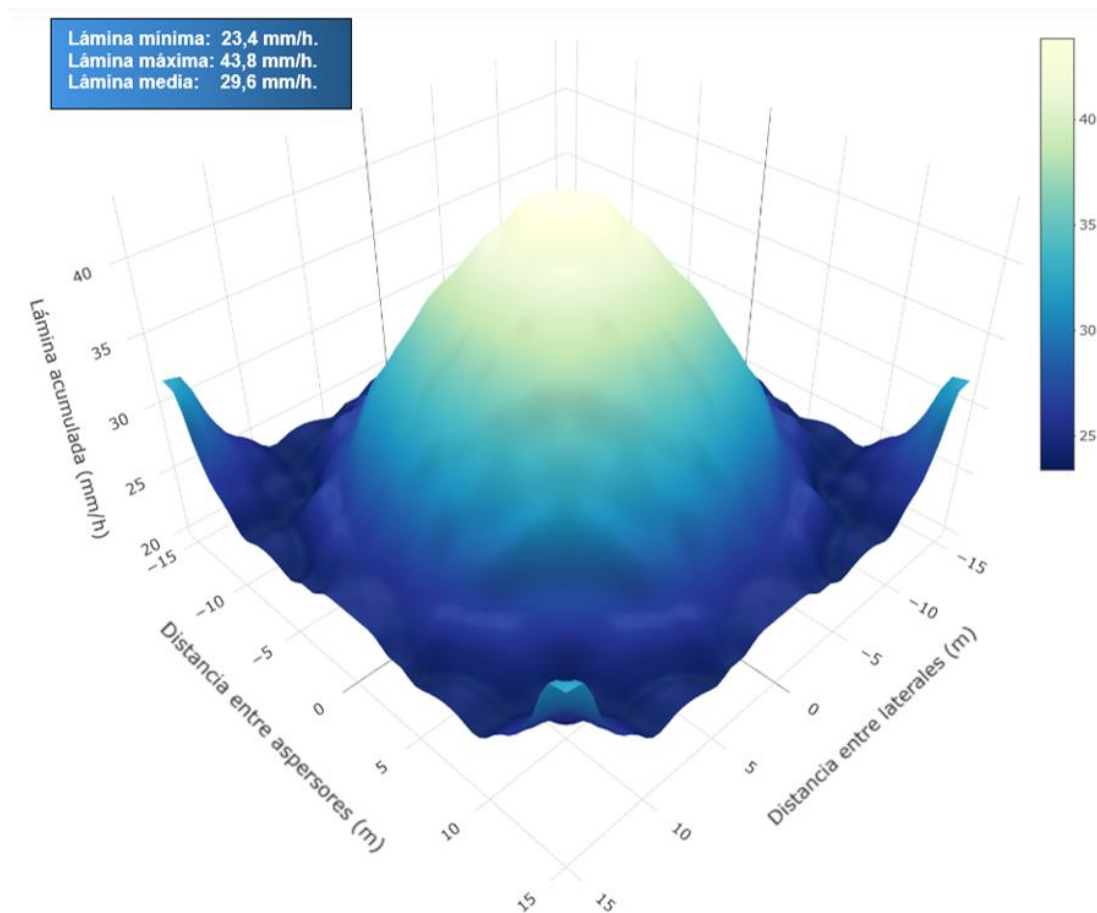


Figura 17. Representación tridimensional de la superposición de las láminas de agua obtenidas mediante simulación para un conjunto de dieciséis emisores equipados con boquillas de 16 mm y presión de operación de 3 bar, dispuestos bajo el marco de aspersión de 30 x 30 m.

En la Figura 18, correspondiente a la boquilla de 18 mm, se observa que, a una presión de 2 bar, los coeficientes reflejan una distribución irregular del agua, con CUC entre 62 % y 75 %, DULq en el rango de 35 % a 71 %, y CV comprendido entre 28 % y 44 %. De acuerdo con la literatura citada, estos valores se clasifican entre regulares y pobres, lo que evidencia una aplicación

heterogénea del agua, con una clara disminución de la uniformidad en los marcos de mayor espaciamiento ($\geq 36 \times 36$ m). Este comportamiento es consistente con lo observado en las curvas radiales de la Figura 12 (C), donde a 2 bar se registró una depresión prolongada entre 4 y 8 m, con valores mínimos de $3,5 \text{ mm h}^{-1}$ y una disminución abrupta en la periferia del alcance (32 m, según Tabla 2). En conjunto, estos factores explican la baja uniformidad general, asociada a una superposición insuficiente entre los patrones de mojado.

Al incrementar la presión a 3 bar, la uniformidad del riego mejoró notablemente, alcanzando los valores máximos de todo el conjunto de ensayos. El CUC llegó a 93 % y el DUlq a 90 % en el marco 30×30 m, mientras que el CV descendió hasta 9 %, lo que representa una distribución altamente homogénea del agua. Estos valores corresponden a una uniformidad excelente, y se mantienen incluso por encima de los rangos reportados por El-Wahed et al. (2016) en estudios comparables (CUC = 78–91 %). Este comportamiento se explica por el perfil radial más estable y extendido descrito en la Figura 12 (C), donde la tasa de aplicación se mantuvo elevada y continua entre 13 y 27 m, sin descensos pronunciados hacia la periferia. La Tabla 2 complementa este resultado, mostrando un radio de alcance de 36 m, un diámetro efectivo (D) de 65 m y una velocidad de viento moderada ($1,1 \text{ m s}^{-1}$), condiciones que favorecieron la superposición uniforme entre emisores. En consecuencia, 3 bar puede considerarse la presión óptima de funcionamiento

para la boquilla de 18 mm, ya que ofrece el mejor equilibrio entre alcance y uniformidad.

A una presión de 4 bar, en algunos marcos los valores de los coeficientes fueron inferiores a los de 3 bar, aunque mostraron mayor estabilidad general entre espaciamientos. El CUC varió entre 68 % y 83 %, el DUlq entre 51 % y 81 %, y el CV en un rango de 21–36 %. Este comportamiento coincide con el aumento de la velocidad del viento a $2,3 \text{ m s}^{-1}$ (Tabla 2), valor más alto registrado en los ensayos, el cual afectó la estabilidad del patrón de aplicación en la periferia del chorro. En la Figura 12 (C), esta condición se asocia a una mayor irregularidad en la curva radial a 4 bar, caracterizada por un segundo pico muy agudo ($14,2 \text{ mm h}^{-1}$) seguido de una caída abrupta después de los 25 m, lo que provocó una mayor dispersión de la lámina aplicada y, por tanto, pérdida de uniformidad.

En síntesis, los resultados de la Figura 18 confirman que la boquilla de 18 mm alcanza su mejor desempeño hidráulico a 3 bar, condición en la que se obtuvieron los mayores valores de uniformidad (CUC = 93 %, DUlq = 90 %) y el menor coeficiente de variación (9 %), bajo condiciones de viento moderadas. De manera complementaria, la Figura 19 muestra la representación tridimensional de la superposición de láminas correspondiente al marco 30 x 30 m a 3 bar, configuración en la que se logró la distribución más homogénea del agua entre todas las boquillas evaluadas. En dicha visualización se evidencia una distribución del agua continua y adecuadamente superpuesta

dentro del área cubierta por los emisores. En comparación con las Figuras 15 y 17, correspondientes a las boquillas de 14 y 16 mm, respectivamente, la Figura 19 presenta una superficie más uniforme y con menor variabilidad espacial en la magnitud de las láminas simuladas, reflejando una mayor estabilidad del patrón de riego. Esta representación tridimensional respalda de forma cualitativa los resultados numéricos obtenidos, confirmando que la boquilla de 18 mm exhibió el mejor desempeño en términos de uniformidad bajo las condiciones evaluadas.

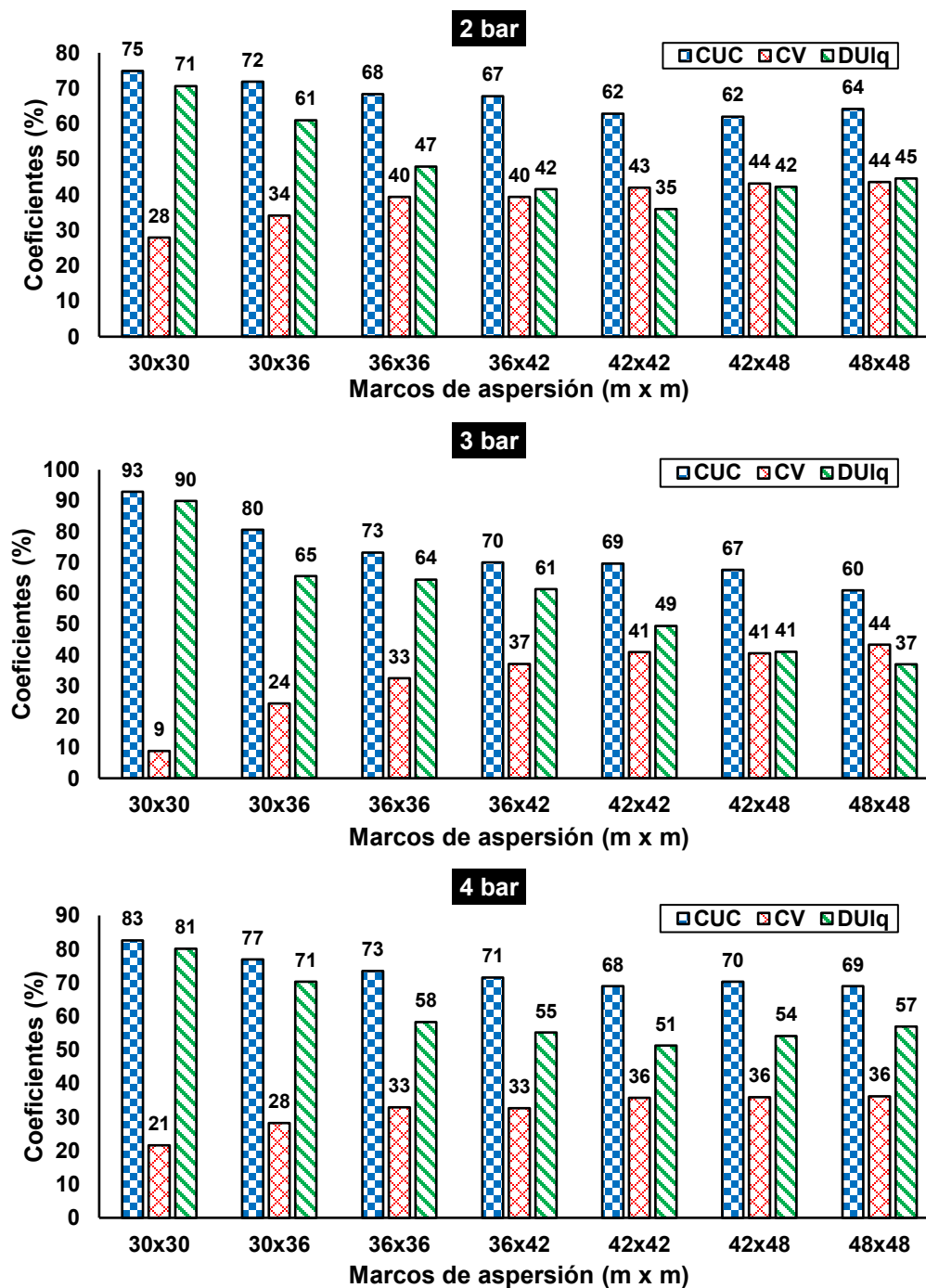


Figura 18. Coeficientes de uniformidad; Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC), Coeficiente de Variación (CV) y Uniformidad de Distribución del Cuarto Menor (DUlq), con respecto a los marcos de aspersión simulados para cada una de las presiones evaluadas (2 ,3 y 4 bar) en la boquilla de 18 mm.

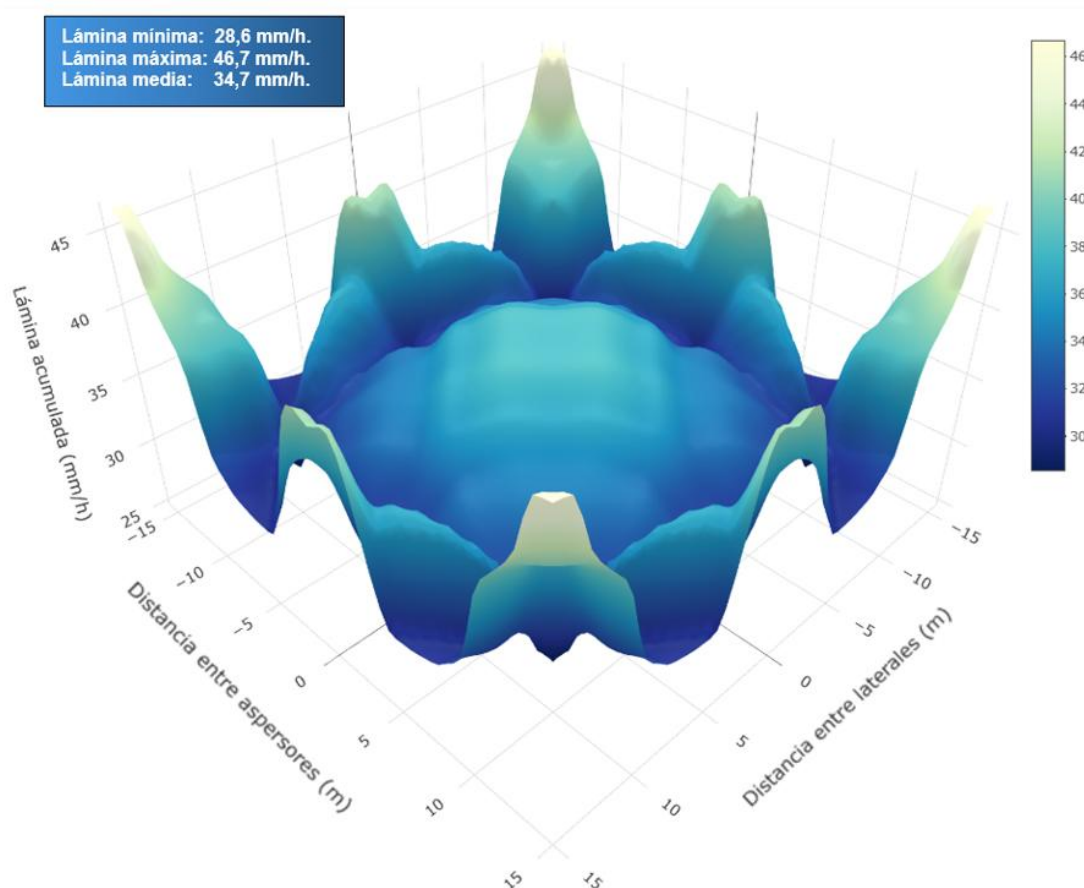


Figura 19. Representación tridimensional de la superposición de las láminas de agua obtenidas mediante simulación para un conjunto de dieciséis emisores equipados con boquillas de 18 mm y presión de operación de 3 bar, dispuestos bajo el marco de aspersión de 30 x 30 m.

A pesar de las recomendaciones descritas en la sección 3.5.3, donde se establece el espaciamiento máximo entre emisores en función del radio de alcance y de la velocidad del viento (Tabla 2), los resultados obtenidos evidencian que los marcos de aspersión más compactos (30 x 30 m y 30 x 36 m) proporcionaron los valores más altos de uniformidad en todas las configuraciones presión–boquilla. En contraste, los espaciamientos mayores o

iguales a 42 x 42 m presentaron una disminución significativa en los coeficientes CUC y DUlq, reflejando una pérdida progresiva de superposición entre patrones de aplicación, aspecto que se sintetiza en la Tabla 3 mediante la comparación de las configuraciones con mayor y menor uniformidad para cada boquilla.

Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones experimentales del presente estudio, particularmente las velocidades de viento registradas y los alcances efectivos de cada boquilla, la aplicación estricta del criterio teórico de espaciamiento (basado en $0,6D$ o $2^{1/2}R$) no garantiza una uniformidad óptima, por lo que se recomienda privilegiar marcos más cerrados cuando se busca maximizar la eficiencia hidráulica del sistema de aspersión.

Cabe señalar que las uniformidades analizadas corresponden a simulaciones computacionales, por lo que los valores obtenidos y las representaciones tridimensionales asociadas constituyen una aproximación teórica al comportamiento real del sistema. En condiciones de campo, factores como las diferencias en el ajuste individual de los aspersores, la microvariabilidad del viento y las fluctuaciones de presión pueden modificar la distribución efectiva del agua, dificultando que todos los emisores reproduzcan un patrón idéntico. No obstante, las simulaciones permiten visualizar tendencias generales y predecir configuraciones potencialmente más eficientes, confirmando que los marcos compactos ofrecen el mejor compromiso entre cobertura y uniformidad bajo las condiciones evaluadas.

Tabla 2. Radios de alcance (R), velocidad de viento registrada (V), diámetros efectivos de humedecimiento (D) y espaciamientos recomendados (0,6D x 0,6D y 2^{1/2}R x 2^{1/2}R) según criterios indicados en la sección 3.5.3., para cada configuración presión-boquilla.

Presión (bar)	Boquilla (mm)	R (m)	V (m s ⁻¹)	D (m)	0,6D x 0,6D		2 ^{1/2} R x 2 ^{1/2} R	
2	14	30	1,2	54	32	32	42	42
	16	33	1,5	58	35	35	46	46
	18	32	1,1	58	35	35	45	45
3	14	34	1,1	61	37	37	48	48
	16	36	0,9	65	39	39	50	50
	18	36	1,1	65	39	39	50	50
4	14	36	0,5	65	39	39	50	50
	16	35	1,1	63	38	38	49	49
	18	36	2,3	61	37	37	50	50

Tabla 3. Valores máximos y mínimos de uniformidad (CUC, CV y DUIq) para cada boquilla, según presión de operación y marco de aspersión.

Boquilla (mm)	Presión (bar)	Marco de aspersión (m x m)	CUC (%)	CV (%)	DUIq (%)
14	2	42x42	53	52	37
	4	30x30	87	15	85
16	2	42x42	63	43	37
	3	30x30	84	19	81
18	3	48x48	60	44	37
	3	30x30	93	9	90

5.3. Relación caudal-presión

Tomando en consideración lo planteado por César et al. (2004), quienes señalan que el exponente de la ecuación potencial de ajuste obtenida a partir de datos experimentales de caudal-presión expresa la sensibilidad del caudal frente a las variaciones en la presión de operación, se presentan en la Figura 20 los ajustes potenciales realizados para cada boquilla evaluada. En todos los casos, las ecuaciones mostraron altos coeficientes de determinación ($R^2 > 0,94$), lo que respalda la pertinencia del modelo potencial utilizado para describir el comportamiento hidráulico del aspersor dentro del rango evaluado. El valor del exponente aumentó progresivamente con el diámetro de la boquilla, evidenciando que las boquillas de mayor tamaño presentan una mayor sensibilidad del caudal ante los cambios de presión, mientras que en las de menor diámetro esta relación es menos pronunciada. De acuerdo con la Figura 20 y la Tabla 4, en todos los casos se observa una tendencia creciente del caudal conforme aumenta la presión de operación. Los valores de caudal experimental fueron sistemáticamente superiores a los reportados en la ficha técnica del aspersor SIME modelo Duplex (Tabla 4), con incrementos porcentuales entre 19 % y 47 % respecto a los valores de catálogo, siendo estas diferencias más evidentes a bajas presiones (2 bar). Por otra parte, los caudales medidos en terreno mostraron una tendencia coherente con los valores indicados por el fabricante, manteniendo una relación creciente y consistente entre presión y caudal, lo que indica que el

aspersor conservó un comportamiento hidráulico estable bajo las condiciones específicas de evaluación.

El incremento observado respecto a la ficha técnica puede atribuirse a diversas fuentes de desviación experimental: ajustes de calibración del manómetro instalado antes del aspersor, deformaciones o torsiones en las extensiones utilizadas durante el aforo, o turbulencias inducidas por el impacto del chorro en el recipiente colector de 220 L, las cuales pudieron afectar la precisión volumétrica de las mediciones. A pesar de estas posibles fuentes de error, la relación presión–caudal generada mantuvo una correspondencia clara con el patrón indicado por el fabricante, lo que demuestra que el comportamiento hidráulico del aspersor fue reproducido de manera aceptable.

En síntesis, si bien el estudio se acotó a un conjunto limitado de combinaciones de boquilla y presión respecto del rango completo indicado en el catálogo del aspersor Duplex, el cual abarca boquillas entre 12 y 22 mm y presiones de 1,5 a 6 bar, los resultados obtenidos en la Figura 20 y la Tabla 4 muestran que la relación caudal–presión del equipo evaluado puede caracterizarse adecuadamente mediante un modelo potencial dentro del intervalo analizado. Este comportamiento proporciona un fundamento técnico claro para identificar la presión de operación más adecuada en función del caudal requerido para cada boquilla, contribuyendo a la selección de parámetros de trabajo acordes con las condiciones hidráulicas disponibles en campo. No obstante, para mejorar la precisión en futuras evaluaciones y reducir las fuentes de error observadas en el aforo experimental, se recomienda complementar el

procedimiento con instrumentos de medición más exactos, tales como caudalímetros o contadores volumétricos instalados inmediatamente antes del aspersor, a fin de obtener estimaciones más representativas del desempeño real del equipo bajo distintas configuraciones de operación.

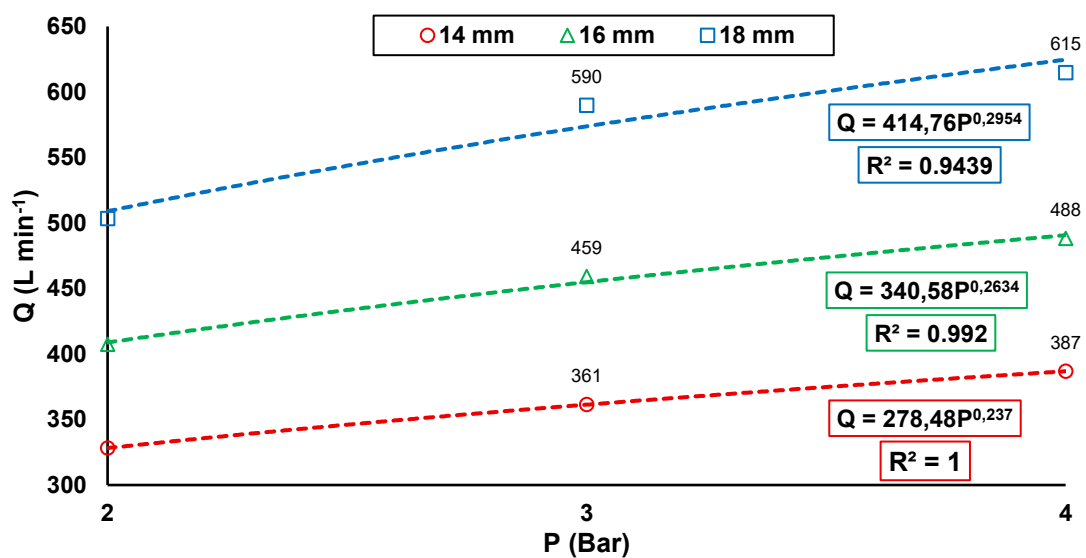


Figura 20. Relación caudal-presión (Q y P, respectivamente) y ecuaciones de ajuste potencial según boquillas evaluadas (14, 16 y 18 mm).

Tabla 4. Caudal del aspersor extraído de su ficha técnica (SIME, s.f.) y obtenido de forma experimental (Q Ficha técnica y Q Experimental, respectivamente) según boquilla (principal y secundaria) y presión de operación utilizada, y porcentaje de aumento del caudal con respecto a lo registrado en la ficha técnica (Aumento de Q).

Boquilla (mm)	Presión (Bar)	Q Ficha técnica		Q Experimental		Aumento de Q (%)
		(L min ⁻¹)	(m ³ h ⁻¹)	(L min ⁻¹)	(m ³ h ⁻¹)	
14 - 8	2	230	14	328	20	43
	3	280	17	361	22	29
	4	325	20	387	23	19
16 - 8	2	282	17	407	24	44
	3	344	21	459	28	33
	4	399	24	488	29	22
18 - 8	2	343	21	503	30	47
	3	434	26	590	35	36
	4	506	30	615	37	21

6. CONCLUSIONES

- Las curvas de tasa de aplicación permitieron caracterizar adecuadamente el patrón de distribución radial del aspersor, evidenciándose un comportamiento mayoritariamente bimodal en todas las boquillas evaluadas. La presión de 3 bar generó los perfiles más estables, con transiciones suaves entre los máximos y mínimos y una disminución gradual hacia la periferia, lo que favoreció la superposición de láminas en las simulaciones. La configuración de 18 mm a 3 bar presentó el patrón más uniforme del conjunto, hecho que también quedó reflejado en la representación tridimensional, donde se observó una superficie regular y de baja variabilidad en la altura de la lámina, en contraste con las mayores irregularidades registradas para las boquillas de 14 y 16 mm.
- La evaluación de la uniformidad de aplicación evidenció diferencias claras entre las combinaciones de boquilla, presión y marco de aspersión, estableciendo que la boquilla de 18 mm operando a 3 bar en el espaciamiento 30 x 30 m ofreció el mejor desempeño, con métricas de uniformidad destacadas (CUC = 93 %, DUIq = 90 %, CV = 9 %). Para las boquillas de 16 y 18 mm, la presión de 3 bar entregó las mayores uniformidades, mientras que para la boquilla de 14 mm el mejor resultado se obtuvo a 4 bar. Asimismo, se determinó que la presión de 2 bar produjo las menores uniformidades en las tres boquillas, y que la de 4 bar solo mejoró parcialmente el desempeño en marcos amplios. Aunque la literatura

plantea espaciamientos definidos a partir del radio de alcance o del diámetro efectivo, los resultados de este estudio demostraron que los marcos compactos, especialmente 30 x 30 m y 30 x 36 m, generaron las uniformidades más altas, constituyendo la alternativa más adecuada para el aspersor evaluado.

- El análisis de la relación caudal–presión mostró que los datos experimentales se ajustaron adecuadamente a un modelo de tipo potencial en todas las boquillas evaluadas ($R^2 > 0,94$), permitiendo describir la sensibilidad del caudal frente a los cambios en la presión de operación. El exponente del ajuste aumentó con el diámetro de la boquilla, lo que indica una mayor variación del caudal en boquillas de mayor tamaño dentro del rango analizado. Los caudales experimentales fueron consistentemente superiores a los valores de catálogo, con diferencias más pronunciadas a bajas presiones, lo que confirma la necesidad de evaluar este tipo de aspersores bajo condiciones operativas específicas. Estas desviaciones, asociadas a fuentes de error propias del aforo experimental, resaltan la conveniencia de incorporar instrumentos de mayor precisión, como caudalímetros o contadores volumétricos instalados antes del aspersor, para mejorar la confiabilidad de futuras evaluaciones y obtener mediciones más representativas del desempeño real del equipo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Agnieszka, D. (2020). Artículo Técnico: Importancia de riego tecnificado en el sur de Chile. *Noticias UACH*. Obtenido de <https://diario.uach.cl/articulo-tecnico-importancia-de-riego-tecnificado-en-el-sur-de-chile/>
- Banco Mundial. (2017). *A nivel mundial, el 70 % del agua dulce es utilizada para la agricultura*. Obtenido de https://blogs.worldbank.org/es/opendata/el-70-del-agua-dulce-es-utilizada-para-la-agricultura?utm_source=chatgpt.com
- Bandala, M. G., Rovelo, C. O., Bautista-Capetillo, C., González-Trinidad, J., Júnez-Ferreira, H. E., Palestina, M. S., . . . Recendez, M. I. (2022). Analysis of irrigation performance of a Solid-Set sprinkler irrigation system at different experimental conditions. *Water*.
- César, J. H., Da Silva, A. M., Rocha, F. A., & De Mello, C. R. (2024). Avaliação técnica de um aspersor canhão do tipo turbina. *Ciência E Agrotecnologia*.
- Colegio de Ingenieros de Chile A.G. (2022). *Recursos hídricos en la agricultura: riego por aspersión, el último informe de Comisión de Infraestructura Pública*.
- Corrales J., J. P. (2011). *EVALUACIÓN DE UN DISPOSITIVO ANTINEBLINA EN RIEGO POR MICROASPERSIÓN*.

- De a Minhoni, R. T., Pereira, F. F., Da Silva, T. B., Castro, E. R., & Saad, J. C. (2020). THE PERFORMANCE OF EXPLICIT FORMULAS FOR DETERMINING THE DARCY-WEISBACH FRICTION FACTOR. *Engenharia Agrícola*.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2025). *Sistema Nacional de Información de Aguas (SNIA) – Datos meteorológicos horarios*. Obtenido de https://snia.mop.gob.cl/dgasat/pages/dgasat_param/dgasat_param.jsp?param=1
- Elwadie, N. M., Mao, N. L., & Bralts, N. V. (2010). A simplified method for field evaluation of solid set sprinkler irrigation systems. *Applied Engineering in Agriculture*.
- El-Wahed, M. H., Medici, M., & Lorenzini, G. (2016). Sprinkler irrigation uniformity: Impact on the crop yield and water use efficiency. *Journal of Engineering Thermophysics*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). *World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2020*. Obtenido de <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/fe3b44ad-553a-4d2f-b8d9-d0ef1dc509ed/content>
- Ge, M., Wu, P., Zhu, D., & Zhang, L. (2019). Comparisons of spray characteristics between vertical impact and turbine drive sprinklers—A case study of the 50PYC and HY50 big gun-type sprinklers. *Agricultural Water Management*.

- Jara, J., & Holzapfel, E. (s.f.). *RIEGO PRESURIZADO*. Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.
- Jiang, Y., Xiang, Q., Li, H., & Xu, Z. (2020). Flow Characteristics and Hydraulic Performance of a Gun-Type Impact Sprinkler with and without Aeration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.
- Keller, J., & Bliesner, R. D. (1990). *Sprinkle and trickle irrigation*.
- Maroufpoor, E., Faryabi, A., Ghamarnia, H., & Moshrefi, G. Y. (2010). Evaluation of uniformity coefficients for sprinkler irrigation systems under different field conditions in Kurdistan Province (Northwest of Iran). *Soil and Water Research*.
- Martin, F., & Saavedra, F. (2018). Irrigated agriculture. En *Water Policy in Chile* (págs. 165-177).
- Ministerio Del Medio Ambiente (MMA). (2021). *Sexto Reporte del Estado del Medio Ambiente*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2009). *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*.
Obtenido de https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf
- Prado, G. D. (2016). Water distribution from medium-size sprinkler in solid set sprinkler systems. *evista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*.

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*.

SIME. (s.f.). Aspersor de Riego 2" SIME Duplex: Ficha técnica. Obtenido de https://drive.google.com/file/d/1BFHo_FLT3iO_TcH4Ti79Y0spihNA7jD0/view

Stambouli, T., Zapata, N., & Faci, J. M. (2013). Performance of new agricultural impact sprinkler fitted with plastic nozzles. *Biosystems Engineering*.

Statista. (2025). *Share of economic sectors in the global gross domestic product (GDP) from 2013 to 2023*. Obtenido de <https://www.statista.com/statistics/256563/share-of-economic-sectors-in-the-global-gross-domestic-product/>

Windfinder. (2025). *Previsión del viento y el tiempo para Aeródromo General Bernardo O'Higgins*. Obtenido de https://es.windfinder.com/forecast/chillan_aeropuerto

8. ANEXOS

8.1. Componentes del cabezal de riego

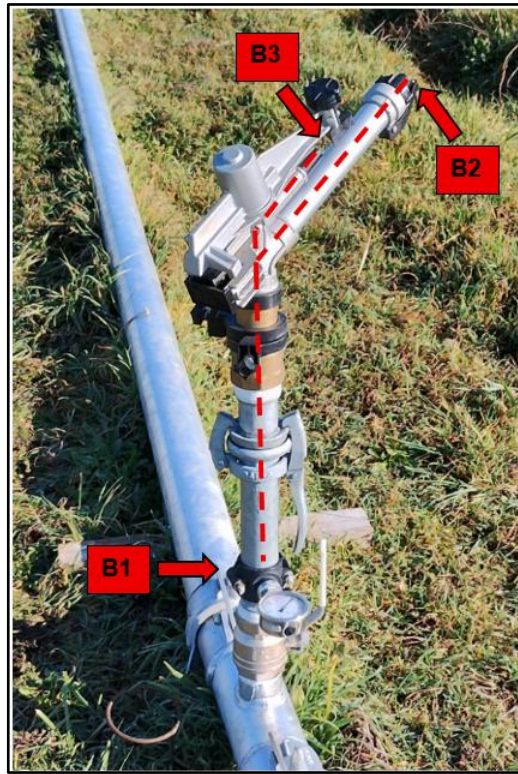
Tabla 5. Componentes del cabezal de riego.

Componente	Cantidad
Estanque (10 m ³)	3
Terminal PVC (2 1/2")	3
Válvula de bola (2 1/2")	3
Unión americana (75 mm)	5
Codo (75 mm)	6
Tee (75 mm)	4
Terminal Hi (75 mm x 2 1/2")	1
Tubo brida (2 1/2")	1
Bomba Vogt (10 Hp)	1
Reducción brida (2" x 2 1/2")	1
Niple (2 1/2")	1
Bushing He Hi (3" x 2 1/2")	1
Terminal Hi (90 mm x 3")	1
Terminal He (90 mm x 3")	8
Válvula de bola (3")	4
Unión americana (90 mm)	3
Codo (90 mm)	5
Collarín (90 mm x 1/2")	2
Manómetro + bushing (1/2")	2
Collarín (90 mm x 1")	2
Válvula de aire Api (1")	2
Tee (90 mm)	3
Reducción larga (90 x 63 mm)	2
Terminal He (63 mm x 2")	1
Bomba Reggio (5,5 Hp)	1
Reducción brida (1 1/4" x 2")	1
Terminal Hi (63 mm x 2")	1
Terminal Hi (4")	1
Reducción larga (90 x 75 mm)	1

8.2. Pérdidas de carga por fricción en tramos de manguera Mallaflex

Dado que el aforo experimental se realizó considerando ambas boquillas del aspersor Duplex (principal y secundaria), inicialmente se obtuvo el caudal total descargado para cada combinación boquilla–presión (Tabla 4). Sin embargo, para determinar las pérdidas de carga en los tramos de manguera Mallaflex fue necesario estimar el caudal que efectivamente circuló hacia cada salida del aspersor.

Para ello se desarrolló un modelo hidráulico basado en el principio de Bernoulli, el balance de masa y la ecuación de Darcy–Weisbach para el cálculo de pérdidas por fricción. El sistema incluyó el tramo principal de 2” (que conduce el caudal total desde el manómetro hasta la bifurcación) y dos ramales independientes que alimentan a la boquilla principal y a la boquilla secundaria (Figura 21).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Esquema de puntos y líneas de flujo considerados en los balances de energía: Bernoulli 1 (B1) desde el manómetro hasta la boquilla principal (B2) y Bernoulli 1 (B1) desde el manómetro hasta la boquilla secundaria (B3).

Las pérdidas por fricción en cada tramo se calcularon mediante la ecuación de Darcy–Weisbach (Ecuación 6), mientras que el factor de fricción f se determinó a partir de la ecuación implícita de Colebrook–White (Ecuación 7), en base a lo indicado por De Minhoni et al. (2020). El número de Reynolds se obtuvo mediante la Ecuación 8. Cuando se verificó un régimen laminar ($Re < 2000$), el factor de fricción se estimó mediante la relación $f = 64/Re$ (Ecuación 9); de lo contrario, se utilizó la ecuación de Colebrook–White.

Además, para representar hidráulicamente la bifurcación del flujo en el punto donde el caudal total se divide entre las boquillas principal y secundaria, se incluyeron pérdidas singulares mediante coeficientes de pérdida asumidos. En particular, la derivación hacia la boquilla principal se modeló mediante el coeficiente equivalente a una tee a 45°, mientras que la derivación hacia la boquilla secundaria se representó mediante el coeficiente asociado a un codo a 45°. Adicionalmente, la boquilla principal, independientemente de su diámetro, se trató como una reducción a efectos del cálculo de pérdidas locales. Estos elementos no corresponden a componentes físicos presentes en el aspersor, sino a elementos hidráulicamente equivalentes utilizados para describir la disipación de energía en la bifurcación.

El sistema completo quedó conformado por dos ecuaciones de Bernoulli independientes (Ecuaciones 10 y 11) y un balance de masa (Ecuación 12), el cual asegura que la suma de los caudales parciales corresponde al caudal total medido durante el aforo.

$$H_f = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2 \cdot g} \quad [6]$$

donde:

H_f : Pérdida de carga por fricción (m).

f : Factor de fricción de Darcy–Weisbach (adimensional).

L : Longitud de la tubería (m).

V : Velocidad del flujo (m s^{-1}).

D: Diámetro tubería (m).

g: Aceleración de gravedad (9,81 m s⁻²).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}} \right] \quad [7]$$

donde:

f: Factor de fricción de Darcy–Weisbach (adimensional).

ε: Rugosidad absoluta del material (m).

D: Diámetro tubería (m).

Re: Número de Reynolds (adimensional).

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad [8]$$

donde:

Re: Número de Reynolds (adimensional).

ρ = Densidad del agua (kg m⁻³).

V: Velocidad del flujo (m s⁻¹).

D: Diámetro tubería (m).

μ: Viscosidad dinámica (Pa·s).

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad [9]$$

donde:

f: Factor de fricción de Darcy–Weisbach (adimensional).

Re: Número de Reynolds (adimensional).

$$\frac{P_{2''}}{\gamma} + \frac{V_{2''}^2}{2g} = z_{Bprin} + \frac{V_{RBprin}^2}{2g} + H_{f,2''}(Q_t) + H_{f,RBprin}(Q_{RBprin}) + K_{tee} \cdot \frac{V_{RBprin}^2}{2g} + K_{red} \cdot \frac{V_{red}^2}{2g} \quad [10]$$

donde:

$P_{2''}$: Presión tramo de 2" (Pa).

γ : Peso específico ($N\ m^{-3}$).

$V_{2''}$: Velocidad tramo de 2" ($m\ s^{-1}$).

g : Aceleración de gravedad ($9,81\ m\ s^{-2}$).

z_{Bprin} : Altura de la boquilla principal con respecto al nivel de referencia (m).

V_{RBprin} : Velocidad ramal de boquilla principal ($m\ s^{-1}$).

$H_{f,2''}$: Pérdidas de carga tramo 2" (m).

Q_t : Caudal total ($m^3\ s^{-1}$).

$H_{f,RBprin}$: Pérdidas de carga en ramal que conduce a boquilla principal (m).

Q_{RBprin} : Caudal parcial en ramal que conduce a boquilla principal ($m^3\ s^{-1}$).

K_{tee} : Coeficiente de pérdida para tee 45° (adimensional).

K_{red} : Coeficiente de pérdida para reducción (adimensional).

V_{red} : Velocidad en reducción (boquilla principal) ($m\ s^{-1}$).

$$\frac{P_{2''}}{\gamma} + \frac{V_{2''}^2}{2g} = z_{Bsec} + \frac{V_{RBsec}^2}{2g} + H_{f,2''}(Q_t) + H_{f,RBsec}(Q_{RBsec}) + K_{codo} \cdot \frac{V_{RBsec}^2}{2g} \quad [11]$$

donde:

$P_{2''}$: Presión tramo de 2" (Pa).

γ : Peso específico ($N\ m^{-3}$).

$V_{2''}$: Velocidad tramo de 2" ($m\ s^{-1}$).

g : Aceleración de gravedad ($9,81 \text{ m s}^{-2}$).

z_{Bsec} : Altura de la boquilla secundaria con respecto al nivel de referencia (m).

V_{RBsec} : Velocidad ramal de boquilla secundaria (m s^{-1}).

$H_{f,2''}$: Pérdidas de carga tramo 2" (m).

Q_t : Caudal total ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$).

$H_{f,\text{RBsec}}$: Pérdidas de carga en ramal que conduce a boquilla secundaria (m).

Q_{RBsec} : Caudal parcial en ramal que conduce a boquilla secundaria ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$).

K_{codo} : Coeficiente de pérdida para codo 45° (adimensional).

$$Q_t = Q_{\text{RBprin}} + Q_{\text{RBsec}} \quad [12]$$

donde:

Q_t : Caudal total ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Q_{RBprin} : Caudal parcial en ramal que conduce a boquilla principal ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Q_{RBsec} : Caudal parcial en ramal que conduce a boquilla secundaria ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Este sistema se resolvió numéricamente mediante un script en R (Sección 7.2.1), determinándose en cada caso los caudales que circulan hacia la boquilla principal y la boquilla secundaria. Estos valores satisfacen simultáneamente el balance energético y el balance de masa para cada combinación boquilla–presión incluida en la Tabla 4. Posteriormente, utilizando los caudales obtenidos para cada ramal y la ecuación de Darcy–Weisbach junto con el factor de fricción calculado mediante Colebrook–White, se determinaron las pérdidas de carga en cada tramo de manguera Mallaflex

empleado en el aforo. Los resultados se presentan en la Tabla 6, donde se muestra el caudal total, los caudales parciales hacia cada boquilla y las pérdidas de carga en los tramos correspondientes.

Tabla 6. Caudal total (Q_{total}), caudal en boquilla principal (Q_{bprin}), caudal en boquilla secundaria (Q_{bsec}), pérdidas de carga en tramo de manguera Mallaflex utilizada en boquilla principal (H_f manguera bprin) y pérdidas de carga en tramo de manguera Mallaflex utilizada en boquilla secundaria (H_f manguera bsec), según cada configuración boquilla-presión implementada en el aforo del aspersor Duplex.

Boquilla (mm)	Presión (Bar)	Q_{total} (L min ⁻¹)	Q_{bprin} (L min ⁻¹)	Q_{bsec} (L min ⁻¹)	H_f manguera bprin (m.c.a.)	H_f manguera bsec (m.c.a.)
14 - 8	2	328	269	59	5,6	0,27
	3	361	294	67	6,6	0,34
	4	387	314	73	7,5	0,41
16 - 8	2	407	337	70	8,7	0,38
	3	459	379	80	10,9	0,49
	4	488	401	87	12,2	0,57
18 - 8	2	503	418	85	13,3	0,54
	3	590	490	100	18,2	0,75
	4	615	509	106	19,6	0,83

8.2.1. Script implementado para la obtención de caudales parciales y pérdidas de carga

```
# --- Librerías -----
if(!require(nloptr)) install.packages("nloptr", repos = "https://cloud.r-
project.org")
library(nloptr)

# --- Parámetros físicos y rugosidades -----
g <- 9.81
rho <- 1000
mu <- 1.0016e-3      # Pa·s

# Rugosidades
eps_rigida <- 0.000015 # 0.015 mm para tuberías rígidas (m)
eps_mflex <- 0.00005  # 0.05 mm para manguera Mallaflex (m)

# --- Geometría (m) -----
D1 <- 0.063 # tramo común 63 mm
D2 <- 0.030 # ramal 30 mm (hacia boquilla 14 mm)
D14 <- 0.014 # boquilla 14 mm
D3 <- 0.008 # boquilla 8 mm

# Longitudes (m)
L_63 <- 0.80
L_30_12 <- 0.50
L_8_13 <- 0.20

# Elevaciones (m)
```

```

z2 <- 1.00

z3 <- 0.95

# Pérdidas menores (singulares)

K_Tee45 <- 0.50

K_red <- 0.50

K_codo45 <- 0.35

# Casos (los 9)

casos <- data.frame(

  P_bar = c(2,3,4,2,3,4,2,3,4),

  Q1_Lmin = c(328,361,387,407,459,488,503,590,615)

)

# --- Funciones hidráulicas -----

# velocidad (m/s), Q en m3/s

vel_m <- function(Q_m3s, D) {

  if(Q_m3s <= 0) return(0)

  (4 * Q_m3s) / (pi * D^2)

}

# número de Reynolds

Re_num <- function(Q_m3s, D){

  V <- vel_m(Q_m3s, D)

  if (V == 0) return(0)

  rho * V * D / mu

}

```

```

# Factor f por Colebrook, generalizada con rugosidad eps (m)
colebrook_f <- function(Q_m3s, D, eps){
  Re <- Re_num(Q_m3s, D)
  if(Re <= 0) return(0)
  if(Re < 2000) return(64 / Re) # laminara
  # inicial guess para f
  f <- 0.02
  # iteración fija (30 iteraciones suelen ser suficientes)
  for(k in 1:50){
    term <- (eps/(3.7*D)) + (2.51/(Re*sqrt(f)))
    f_new <- 1 / ( (-2 * log10(term) )^2 )
    # convergencia pequeña
    if(abs(f_new - f) < 1e-12) { f <- f_new; break }
    f <- f_new
  }
  return(f)
}

# Pérdida por fricción Darcy–Weisbach, usando colebrook_f con rugosidad eps
hf_DW_general <- function(Q_m3s, L, D, eps){
  if (Q_m3s <= 0) return(0)
  V <- vel_m(Q_m3s, D)
  f <- colebrook_f(Q_m3s, D, eps)
  h <- f * (L / D) * V^2 / (2 * g)

```

```

return(h)
}
# --- RHS Bernoulli (B1 -> B2 y B1 -> B3) con DW -----
RHS_B2 <- function(Q2_m3s, P1_Pa, Q1_m3s){
  # V en ramal 30 y boquilla 14
  V2_30 <- vel_m(Q2_m3s, D2)
  Vb14 <- vel_m(Q2_m3s, D14)
  # pérdidas por fricción: tramo común (63) usa Q1 y eps_rigida
  hf63 <- hf_DW_general(Q1_m3s, L_63, D1, eps_rigida)
  hf30 <- hf_DW_general(Q2_m3s, L_30_12, D2, eps_rigida)
  # pérdidas menores (tee y reducción en boquilla: K_red mantiene boquilla
singular)
  hm <- K_Tee45 * V2_30^2/(2*g) + K_red * Vb14^2/(2*g)
  H_right <- z2 + Vb14^2/(2*g) + hf63 + hf30 + hm
  return(H_right)
}
RHS_B3 <- function(Q3_m3s, P1_Pa, Q1_m3s){
  Vb8 <- vel_m(Q3_m3s, D3)
  hf63 <- hf_DW_general(Q1_m3s, L_63, D1, eps_rigida)
  hf8 <- hf_DW_general(Q3_m3s, L_8_13, D3, eps_rigida)
  hm <- K_codo45 * Vb8^2/(2*g)
  H_right <- z3 + Vb8^2/(2*g) + hf63 + hf8 + hm
  return(H_right)
}

```

```

}

# --- Residuos y objetivo -----
residuos <- function(x, P1_Pa, Q1_m3s){
  Q2 <- x[1]; Q3 <- x[2]
  # evitar negativos
  if(Q2 <= 0 || Q3 <= 0) return(c(1e6,1e6))
  H_left <- P1_Pa/(rho*g) + vel_m(Q1_m3s, D1)^2/(2*g)
  r1 <- RHS_B2(Q2, P1_Pa, Q1_m3s) - H_left
  r2 <- RHS_B3(Q3, P1_Pa, Q1_m3s) - H_left
  return(c(r1, r2))
}

obj_fun <- function(x, P1_Pa, Q1_m3s){
  r <- residuos(x, P1_Pa, Q1_m3s)
  sum(r^2)
}

eval_g_eq <- function(x, Q1_m3s){
  x[1] + x[2] - Q1_m3s
}

# --- Opciones nloptr (COBYLA) -----
opts <- list(
  algorithm = "NLOPT_LN_COBYLA",
  xtol_rel = 1e-10,
  maxeval = 6000

```

```

)
# --- Loop principal: resolución y cálculo pérdidas en mangueras -----
results <- data.frame()

# Parámetros mangueras Mallaflex (25 mm)
D_mflex <- 0.025 # 25 mm
L_mflex2 <- 1.35 # longitud para Q2 (m)
L_mflex3 <- 1.25 # longitud para Q3 (m)

# rugosidad Mallaflex ya confirmada eps_mflex arriba
for(i in seq_len(nrow(casos))){
  P_bar <- casos$P_bar[i]
  Q1_Lmin <- casos$Q1_Lmin[i]
  P1_Pa <- P_bar * 1e5
  Q1_m3s <- Q1_Lmin / 60000

  # initial guess proportional to boquilla áreas
  A14 <- pi * D14^2 / 4
  A8 <- pi * D3^2 / 4
  Q2_0 <- Q1_m3s * (A14 / (A14 + A8))
  Q3_0 <- Q1_m3s - Q2_0

  # solucionador
  sol <- tryCatch({
    nloptr(
      x0 = c(Q2_0, Q3_0),
      eval_f = function(x) obj_fun(x, P1_Pa, Q1_m3s),

```

```

eval_g_eq = function(x) eval_g_eq(x, Q1_m3s),
lb = c(1e-10, 1e-10),
ub = c(Q1_m3s, Q1_m3s),
opts = opts
)
}, error = function(e) e)
# default NA if fail
Q2_m3s <- NA; Q3_m3s <- NA; conv <- FALSE
Hf2_m <- NA; Hf3_m <- NA
if(inherits(sol, "nloptr")){
  Q2_m3s <- sol$solution[1]
  Q3_m3s <- sol$solution[2]
  conv <- sol$status >= 1 && sol$status <= 4
  # pérdidas en mangueras Mallaflex (usar eps_mflex)
  Hf2_m <- hf_DW_general(Q2_m3s, L_mflex2, D_mflex, eps_mflex)
  Hf3_m <- hf_DW_general(Q3_m3s, L_mflex3, D_mflex, eps_mflex)
} else {
  warning(sprintf("Caso %d: nloptr falló: %s", i, as.character(sol)))
}
results <- rbind(results, data.frame(
  P_bar = P_bar,
  Q1_Lmin = Q1_Lmin,
  Q2_Lmin = ifelse(is.na(Q2_m3s), NA, Q2_m3s * 60000),

```

```

Q3_Lmin = ifelse(is.na(Q3_m3s), NA, Q3_m3s * 60000),
Hf2_m   = Hf2_m,
Hf3_m   = Hf3_m,
converg = conv,
stringsAsFactors = FALSE
))
}
# Reordenar columnas al formato solicitado
results_out          <-          results[,
c("P_bar","Q1_Lmin","Q2_Lmin","Q3_Lmin","Hf2_m","Hf3_m")]
# --- Guardar CSV -----
write.csv(results_out, "resultados_hidraulicos_DW_completo.csv", row.names
= FALSE)
# --- Mostrar resultados -----
print(results_out)
cat("\n ✓          Resultados          guardados          en:
resultados_hidraulicos_DW_completo.csv\n")
cat("Croquis (ruta local):", file_croquis, "\n")

```

8.3. Script implementado en la simulación de marcos de aspersión

```
# -----

# 0) PAQUETES

# -----

req <- c("readxl", "dplyr", "tidyr", "purrr", "stringr", "janitor",
        "readr", "ggplot2", "tibble", "rlang", "plotly", "htmlwidgets")

missing <- req[!vapply(req, requireNamespace, logical(1), quietly = TRUE)]
if (length(missing)) install.packages(missing)

invisible(lapply(req, \p suppressPackageStartupMessages(library(p,
character.only = TRUE))))

message("✅ Todos los paquetes han sido cargados correctamente.")

# -----

# 1) CONFIG

# -----

CONFIG <- list(
  base_dir      = "C:/Users/gasof/OneDrive/Escritorio/Semestre 11/Seminario
de Titulación/Seminario/Análisis R/Simualción/Script_CU_mejorado",
  excel_file    = "Tesis_R.xlsx",
  sheet_name    = "CSV",
  res_m         = 0.5,
  taper_frac    = 0.05,
  k_folds       = 5,
```

```

max_poly_deg = 4,
Num_emisores = "Emisores_4x4",
output_dir   = "Resultados",
save_plots   = TRUE,
# Combinación única de boquilla–presión
boquilla_mm  = 18,
presion_bar  = 3,
# Marco único de simulación
marco_sx     = 30,
marco_sy     = 30,
marco_label  = "30x30"
)
# -----
# Validación del archivo Excel
# -----
excel_path <- file.path(CONFIG$base_dir, CONFIG$excel_file)
if (!file.exists(excel_path))
  stop(sprintf("✘ No se encuentra el archivo: %s", excel_path))
if (!(CONFIG$sheet_name %in% readxl::excel_sheets(excel_path)))
  stop(sprintf("✘ La hoja '%s' no existe en el archivo Excel.",
CONFIG$sheet_name))
message("✔ Archivo Excel y hoja correctamente encontrados.")

```

```

# -----
# Definición del marco único
# -----

spacings <- tibble::tibble(
  sx  = CONFIG$marco_sx,
  sy  = CONFIG$marco_sy,
  marco = CONFIG$marco_label
)

#-----
# 2) LECTURA + LIMPIEZA
#-----

# Carga única de la hoja Excel (con nombres estandarizados)
df_raw <- readxl::read_excel(
  path = excel_path,
  sheet = CONFIG$sheet_name
) |>
  janitor::clean_names()

# -----
# Mapeo flexible de nombres
# -----

default_cols <- list(
  boquilla = c("boquilla_mm", "boquilla"),
  presion = c("presion_bar", "presion"),

```

```

dist  = c("distancia_m", "dist_m", "r"),
tasa  = c("tasa_mm_h", "tasa", "intensidad_mm_h"),
radioef = c("radio_alcance_m", "radio_efectivo_m", "radio_eff_m")
)

match_first <- function(nms, candidates) {
  m <- intersect(candidates, nms)
  if (length(m) > 0) m[1] else NA_character_
}

col_map <- list(
  boquilla = match_first(names(df_raw), default_cols$boquilla),
  presion = match_first(names(df_raw), default_cols$presion),
  dist  = match_first(names(df_raw), default_cols$dist),
  tasa  = match_first(names(df_raw), default_cols$tasa),
  radioef = match_first(names(df_raw), default_cols$radioef)
)

if (any(is.na(unlist(col_map)))) {
  stop(" ✖ Faltan columnas esperadas en la hoja Excel. Revisa nombres o la
hoja indicada.")
}

# -----

# Estandarización del dataset

```

```

# -----
df_std <- df_raw |>
  dplyr::transmute(
    boquilla_mm =
readr::parse_number(as.character(.data[[col_map$boquilla]])),
    presion_bar =
readr::parse_number(as.character(.data[[col_map$presion]])),
    distancia_m = readr::parse_number(as.character(.data[[col_map$dist]])),
    tasa_mm_h = readr::parse_number(as.character(.data[[col_map$tasa]])),
    radio_eff_m = readr::parse_number(as.character(.data[[col_map$radioef]]))
  ) |>
  tidyr::drop_na() |>
  dplyr::arrange(boquilla_mm, presion_bar, distancia_m)

# -----
# Diagnóstico de combinaciones existentes
# -----
message("🔗 Combinaciones boquilla–presión detectadas en el dataset:")

df_std |>
  dplyr::count(boquilla_mm, presion_bar, sort = TRUE) |>
  print(n = Inf)

# -----
# Filtrado oficial según CONFIG

```

```

# -----
df <- df_std |>
  dplyr::filter(
    boquilla_mm == CONFIG$boquilla_mm,
    presion_bar == CONFIG$presion_bar
  )
if (nrow(df) == 0) {
  stop(sprintf(
    "❌ No existen registros para boquilla = %s mm y presión = %s bar.",
    CONFIG$boquilla_mm, CONFIG$presion_bar
  ))
}
message(sprintf(
  "✅ Se seleccionaron %s registros para boquilla = %s mm y presión = %s
bar.",
  nrow(df), CONFIG$boquilla_mm, CONFIG$presion_bar
))
print(df)
# -----
# 3) KERNEL RADIAL & MÉTRICAS
# -----
# -----

```

```

# (A) Formateador de ecuaciones polinómicas (solo para reporte)
# -----
format_poly_equation <- function(coefs, var = "r", digits = 10) {
  vals <- round(coefs, digits)
  eq <- paste0("y = ", formatC(vals[1], format = "f", digits = digits))
  if (length(vals) > 1) {
    for (i in 2:length(vals)) {
      sign_str <- if (vals[i] >= 0) " + " else " - "
      pow_str <- if (i == 2) var else paste0(var, "^", i - 1)
      eq <- paste0(eq, sign_str,
                   formatC(abs(vals[i]), format="f", digits=digits), "**", pow_str)
    }
  }
  eq
}
# -----

# (B) Métricas de ajuste
# -----

calc_metrics <- function(obs, pred) {
  N <- length(obs)
  if (!N) {
    return(data.frame(
      R2 = NA, RMSE = NA, RD = NA, N = 0L
    ))
  }
}

```

```

    ))
  }
  ss_res <- sum((obs - pred)^2)
  ss_tot <- sum((obs - mean(obs))^2)
  R2 <- if (ss_tot == 0) NA else 1 - ss_res/ss_tot
  RMSE <- sqrt(ss_res / N)
  mean_obs <- mean(obs)
  RD <- if (mean_obs == 0) NA else (RMSE / mean_obs) * 100
  data.frame(
    R2 = as.numeric(R2),
    RMSE = as.numeric(RMSE),
    RD = as.numeric(RD),
    N = as.integer(N)
  )
}
# -----
# (C) Función principal: construcción del kernel radial
# -----
make_radial_kernel <- function(profile,
                                taper_frac = 0.05,
                                method = c("spline", "poly"),
                                k_folds = 5,
                                max_poly_deg = 4) {

```

```

method <- match.arg(method)

# Validación obligatoria de columnas
req <- c("distancia_m", "tasa_mm_h", "radio_eff_m")
if (!all(req %in% names(profile))) {
  stop("✘ El perfil no contiene las columnas necesarias: distancia_m,
tasa_mm_h, radio_eff_m.")
}

# Orden y eliminación de duplicados
prof <- profile |>
  dplyr::arrange(distancia_m) |>
  dplyr::distinct(distancia_m, .keep_all = TRUE)

# Verificación de número mínimo de puntos
if (nrow(prof) < 4) {
  stop("✘ Perfil insuficiente: se necesitan ≥ 4 puntos para un ajuste estable.")
}

# Radio efectivo (rmax)
rmax_meas <- max(prof$distancia_m, na.rm = TRUE)
rmax_eff <- max(profile$radio_eff_m, na.rm = TRUE)
if (!is.finite(rmax_eff)) {
  warning("⚠ radio_eff_m indefinido; se usará rmax_meas.")
  rmax_eff <- rmax_meas
}

```

```

# Usar el más restrictivo entre medición y alcance efectivo
rmax <- min(rmax_meas, rmax_eff)

# Asegurar que el perfil comience en r = 0
if (min(prof$distancia_m) > 0) {
  prof <- dplyr::bind_rows(
    tibble::tibble(
      distancia_m = 0,
      tasa_mm_h = prof$tasa_mm_h[1]
    ),
    prof
  )
}

# -----

# (1) Definición del taper radial

# -----

# Radio a partir del cual comienza la atenuación suave (taper)
# Corresponde al (1 - taper_frac) del radio máximo efectivo
r_taper0 <- rmax * (1 - taper_frac)

# Función de ponderación radial (0–1) para atenuar la tasa cerca del borde
taper_w <- function(r) {
  ifelse(
    # Zona interior: sin atenuación (tasa completa); se utiliza P(x) o S(x)
    r < r_taper0,

```

```

1,
ifelse(
  # Zona exterior: fuera del alcance del aspersor (tasa nula); P(x)=0 o
S(x)=0
  r >= rmax,
  0,
  # Zona de transición: atenuación suave tipo coseno
  # Garantiza continuidad y evita cortes bruscos en rmax; se utiliza
P(x)*taper(x) o S(x)*taper(x)
  0.5 * (1 + cos(pi * (r - r_taper0) / (rmax - r_taper0)))
)
)
}
# -----
# (2) Método SPLINE
# -----
if (method == "spline") {
  f_spline <- splinefun(
    prof$distancia_m,
    prof$tasa_mm_h,
    method = "monoH.FC"
  )
  f <- function(r) {

```

```

r_clamped <- pmin(pmax(r, 0), rmax)
pmax(f_spline(r_clamped) * taper_w(r_clamped), 0)
}

pred <- f(prof$distancia_m)
metrics <- calc_metrics(prof$tasa_mm_h, pred)

metrics$metodo <- "spline"
metrics$grado_optimo <- NA_integer_
metrics$equation <- NA_character_

} else {

# -----
# (3) Método POLINÓMICO
# -----

n <- nrow(prof)
min_deg <- 2
max_deg <- min(max(min(6, n - 1L), min_deg), max_poly_deg)

# CV interna

cv_poly_rmse <- function(dat, degree, k = k_folds) {
  set.seed(123)
  folds <- sample(rep(seq_len(k), length.out = nrow(dat)))
  mean(sapply(seq_len(k), function(i) {
    tr <- dat[folds != i, , drop = FALSE]
    te <- dat[folds == i, , drop = FALSE]

```

```

mod <- lm(tasa_mm_h ~ poly(distancia_m, degree, raw = TRUE), data =
tr)

pred <- predict(mod, newdata = te)

sqrt(mean((te$tasa_mm_h - pred)^2))
}))
}

degs <- min_deg:max_deg
best_deg <- if (length(degs) == 1) degs else degs[which.min(
  sapply(degs, cv_poly_rmse, dat = prof)
)]

mod <- lm(tasa_mm_h ~ poly(distancia_m, best_deg, raw = TRUE), data =
prof)

f <- function(r) {
  r_clamped <- pmin(pmax(r, 0), rmax)
  pmax(predict(mod, newdata = data.frame(distancia_m = r_clamped))
    * taper_w(r_clamped), 0)
}

pred <- f(prof$distancia_m)

metrics <- calc_metrics(prof$tasa_mm_h, pred)

metrics$metodo <- "poly"

metrics$grado_optimo <- as.integer(best_deg)

metrics$equation <- format_poly_equation(coef(mod), "r", 10)
}

```

```

return(list(
  rmax = rmax,
  f = f,
  metrics = metrics
))
}
# -----
# 4) SIMULACIÓN (CUC, CV, DUIq) – emisores 4×4
# -----
# Permite construir la grilla de recipientes virtuales
# centrada en (0,0) y con resolución espacial res
construir_grilla <- function(sx, sy, res) {
  # Secuencia de coordenadas en X:
  # desde el borde izquierdo del marco (-sx/2)
  # hasta el borde derecho del marco (+sx/2),
  # con paso igual a la resolución espacial (res)
  x <- seq(-sx/2, sx/2, by = res)
  # Secuencia de coordenadas en Y:
  # desde el borde inferior del marco (-sy/2)
  # hasta el borde superior del marco (+sy/2),
  # con el mismo paso espacial (res)
  y <- seq(-sy/2, sy/2, by = res)
  # Se devuelve una lista con:

```

```

# - los vectores de coordenadas

# - el número de puntos en cada eje

# - el número total de recipientes (puntos de la grilla)

list(
  x = x,          # coordenadas X de la grilla
  y = y,          # coordenadas Y de la grilla
  n_x = length(x),      # número de puntos en X
  n_y = length(y),      # número de puntos en Y
  n_points = length(x) * length(y) # total de recipientes virtuales
)
}

acumular_laminas <- function(f_kernel, n_emisores, grid) {
  # Extrae el vector de coordenadas X de la grilla
  X <- grid$x

  # Extrae el vector de coordenadas Y de la grilla
  Y <- grid$y

  # Inicializa la matriz de lámina acumulada

  # Cada fila corresponde a una posición Y de la grilla

  # Cada columna corresponde a una posición X de la grilla

  # Todos los recipientes virtuales parten con lámina 0

  Z <- matrix(0, nrow = length(Y), ncol = length(X))

  # Loop sobre cada emisor del arreglo (una fila = un emisor con coordenadas
  x,y)

```

```

for (i in seq_len(nrow(n_emisores))) {
  # Calcula la distancia radial R desde el emisor i
  # hacia TODOS los puntos de la grilla simultáneamente
  #
  # outer(Y, X, ...) genera una matriz donde cada celda
  # contiene la distancia al punto (xx, yy)
  R <- sqrt(
    outer(
      Y, X,
      function(yy, xx)
        (xx - n_emisores[i, 1])^2 + # diferencia en X respecto al emisor i
        (yy - n_emisores[i, 2])^2 # diferencia en Y respecto al emisor i
    )
  )
  # Evalúa el kernel radial f(r) en todas las distancias R
  # Convierte el resultado en matriz y lo suma a la lámina acumulada
  Z <- Z + matrix(
    f_kernel(as.vector(R)), # tasa aportada por el emisor i
    nrow = length(Y), # estructura espacial en Y
    ncol = length(X) # estructura espacial en X
  )
}
# Devuelve la matriz final de lámina acumulada

```

```

# (superposición de todos los emisores del arreglo)
Z
}
# -----
# Distancia y aporte individual por emisor
# -----
aporte_por_emisor <- function(f_kernel, n_emisores, grid) {
  # Construye una tabla con todas las coordenadas (x, y)
  # de los recipientes virtuales del marco
  # Cada fila = un punto de la grilla
  grid_df <- expand.grid(
    x_m = grid$x, # coordenadas X de los recipientes
    y_m = grid$y # coordenadas Y de los recipientes
  )
  # Recorre cada emisor del arreglo (uno por uno)
  # seq_len(nrow(n_emisores)) genera la secuencia:
  # 1, 2, ..., número total de emisores
  purrr::imap_dfr(
    seq_len(nrow(n_emisores)),
    # Función que se ejecuta para cada emisor i
    function(i, idx) {
      # Diferencia en X entre cada recipiente y el emisor i
      dx <- grid_df$x_m - n_emisores[i, 1]

```

```

# Diferencia en Y entre cada recipiente y el emisor i
dy <- grid_df$y_m - n_emisores[i, 2]

# Distancia radial desde el emisor i

# hasta cada recipiente virtual
r <- sqrt(dx^2 + dy^2)

# Construye una tabla con:

# - posición del recipiente
# - identificación del emisor
# - distancia emisor–recipiente
# - aporte hidráulico individual
tibble::tibble(
  x_m      = grid_df$x_m,      # coordenada X del recipiente
  y_m      = grid_df$y_m,      # coordenada Y del recipiente
  id_emisor = i,              # identificador del emisor
  x_emisor_m = n_emisores[i, 1], # coordenada X del emisor
  y_emisor_m = n_emisores[i, 2], # coordenada Y del emisor
  distancia_m = r,            # distancia radial (m)
  aporte_mm_h = f_kernel(r)     # aporte del emisor i (mm/h)
)
}
)
}

simulacion_laminas_uniformidad <- function(kernel, sx, sy, res = 0.5,

```

```

sim_type = c("Emisores_4x4")) {
sim_type <- match.arg(sim_type)
if (!is.function(kernel$f) || !is.numeric(kernel$rmax))
  stop("✘ Kernel radial inválido.")

# -----
# 4.1) GRILLA (marco central)
# -----
# Construye la grilla de recipientes virtuales
# centrada en (0,0) y con resolución espacial res
grid <- construir_grilla(sx, sy, res)
# -----
# 4.2) EMISORES CENTRALES (2x2)
# -----
# Define las posiciones geométricas de los 4 emisores
# que delimitan el marco central de evaluación
#
# NOTA: estos emisores NO se usan para calcular la lámina,
# solo sirven como referencia espacial del marco
# la lámina se calcula considerando el arreglo completo 4x4.
central_emitters <- expand.grid(
  x = c(-sx/2, sx/2), # coordenadas X del marco
  y = c(-sy/2, sy/2) # coordenadas Y del marco

```

```

)
# -----
# 4.3) EMISORES 4x4 (relativos)
# -----
# Factores de posición relativa para un arreglo 4x4
# centrado en (0.0)
pos <- c(-1.5, -0.5, 0.5, 1.5)
# Genera las coordenadas (x,y) de los 16 emisores reales
# multiplicando los factores relativos por el espaciamiento
emitters_4x4 <- expand.grid(
  x = pos * sx,
  y = pos * sy
)
emisores_aportantes <- as.matrix(emitters_4x4)
# -----
# 4.4) ACUMULACIÓN DE LÁMINA
# -----
# Calcula la lámina acumulada en cada punto de la grilla
# sumando la contribución radial de los 16 emisores
Z <- acumular_laminas(
  kernel$f,          # función radial f(r)
  emisores_aportantes, # coordenadas de los emisores
  grid              # grilla de evaluación

```

```

)
# Convierte la matriz Z en un vector (todos los recipientes)
v <- as.vector(t(Z))

# Calcula la lámina media sobre el marco
m <- mean(v, na.rm = TRUE)

# Si la media no es válida, aborta la simulación
if (!is.finite(m) || m <= 0)
  return(list(CUC = NA, CV = NA, DUIq = NA))

# -----

# 4.5) MÉTRICAS

# -----

CUC <- (1 - mean(abs(v - m)) / m) * 100
CV <- (sd(v) / m) * 100
n_low <- ceiling(0.25 * length(v))
DUIq <- mean(sort(v)[1:n_low]) / m * 100

# -----

# 4.6) APORTES INDIVIDUALES

# -----

# Calcula el aporte de CADA emisor por separado
# sobre CADA recipiente de la grilla
aportes_individuales <- aporte_por_emisor(
  kernel$f, # Función radial f(r):
  # entrega el aporte (mm/h) en función de la distancia r

```

```

emisores_aportantes, # Matriz de coordenadas de los emisores
# Cada fila es un emisor: (x_emisor, y_emisor)

grid      # Grilla de recipientes virtuales
# Contiene las coordenadas X e Y del marco evaluado
)
# -----
# 4.7) SALIDA EXTENDIDA
# -----
# Devuelve métricas y objetos espaciales útiles
list(
  CUC = as.numeric(CUC), # uniformidad Christiansen (%)
  CV = as.numeric(CV), # coeficiente de variación (%)
  DUlq = as.numeric(DUlq), # uniformidad del cuartil inferior (%)
  # ---- objetos auxiliares ----
  grid = grid, # grilla de recipientes
  central_emitters = central_emitters, # emisores del marco
  emitters_4x4 = emitters_4x4, # emisores reales
  Z_matrix = Z, # matriz de lámina acumulada
  aportes_individuales = aportes_individuales, # lámina aportada por cada
emisor

# Versión larga (x, y, lámina) para gráficos o mapas
Z_long = expand.grid(
  x = grid$x,

```

```

    y = grid$y
  ) |>
    dplyr::mutate(lamina = v)
  )
}
# -----
# 5) PROCESAMIENTO PRINCIPAL
# (1 boquilla-presión, 1 marco)
# -----
# Si la carpeta de salida no existe, se crea
# (evita errores al exportar resultados)
if (!dir.exists(CONFIG$output_dir))
  dir.create(CONFIG$output_dir, recursive = TRUE)
# -----
# Cache de kernels (spline / poly)
# -----
# Se crea un entorno vacío que actuará como memoria temporal
# para almacenar kernels ya calculados y evitar recalcularlos
kernel_cache <- new.env(parent = emptyenv())
# Función que obtiene un kernel desde el cache
# o lo calcula si aún no existe
get_kernel_cached <- function(df_subset, metodo) {
  # Se construye una clave única usando:

```

```

# boquilla, presión y método de ajuste
key <- paste(
  df_subset$boquilla_mm[1],
  df_subset$presion_bar[1],
  metodo, sep = "||"
)

# Si el kernel ya existe en memoria, se devuelve directamente
if (exists(key, envir = kernel_cache, inherits = FALSE))
  return(get(key, envir = kernel_cache))

# Si no existe, se construye el kernel radial
ker <- make_radial_kernel(
  df_subset,
  taper_frac = CONFIG$taper_frac, # fracción del taper
  method     = metodo,           # spline o polinomial
  k_folds    = CONFIG$k_folds,   # validación cruzada
  max_poly_deg = CONFIG$max_poly_deg # grado máximo permitido
)

# Se guarda el kernel en el cache para reutilización futura
assign(key, ker, envir = kernel_cache)

# Se devuelve el kernel recién creado
ker

}

# -----

```

```

# Configuración fija
# -----

# Métodos de ajuste que se evaluarán
metodos <- c("spline", "poly")

# Datos experimentales (una boquilla-presión)
g <- df

# Dimensiones del marco de evaluación
sx <- CONFIG$marco_sx
sy <- CONFIG$marco_sy

# Resolución espacial de la grilla (m)
res <- CONFIG$res_m

# Etiqueta descriptiva del marco (solo para tablas)
marco_label <- CONFIG$marco_label

# Tipo de arreglo de emisores (ej. "Emisores_4x4")
sim_type <- CONFIG$Num_emisores

# -----

# 5.1) Métricas de ajuste de kernels
# -----

# Para cada método (spline y poly):
# se extraen las métricas de ajuste del kernel
metrics_tab <- purrr::map_dfr(
  metodos,
  \(m) {

```

```

# Obtiene el kernel (desde cache o calculado)

mm <- get_kernel_cached(g, m)$metrics

# Construye una fila de métricas por método

tibble::tibble(

  boquilla_mm = g$boquilla_mm[1], # diámetro de boquilla

  presion_bar = g$presion_bar[1], # presión de trabajo

  metodo      = m,                # spline o poly

  R2          = mm$R2,            # coeficiente de determinación

  RMSE       = mm$RMSE,          # error cuadrático medio

  RD         = mm$RD,            # desviación relativa

  grado_optimo = ifelse(m == "poly",

                        as.integer(mm$grado_optimo),

                        NA_integer_), # solo aplica a polinomios

  equation    = ifelse(m == "poly",

                        mm$equation,

                        NA_character_) # ecuación polinómica

)

}

)

# -----

# 5.2) Simulación hidráulica (marco único)

# -----

# Para cada método de kernel:

```

```

# se simula la superposición de emisores
sim_results <- purrr::map(
  metodos,
  \(m) {
    simulacion_laminas_uniformidad(
      kernel = get_kernel_cached(g, m), # kernel radial
      sx     = sx,           # ancho del marco
      sy     = sy,           # alto del marco
      res    = res,         # resolución espacial
      sim_type = sim_type   # tipo de arreglo
    )
  }
)

# Se asignan nombres a los resultados según el método
names(sim_results) <- metodos

#
=====

# 5.3) EXPOSICIÓN DE OBJETOS (Environment → Data, formato TABLA)
#
=====

# -----
# Emisores centrales (2×2)
# -----

```

```

# Se extraen las coordenadas de los emisores centrales
# (solo referencia geométrica)
emisores_centrales <- as.data.frame(
  sim_results[[1]]$central_emitters
)
colnames(emisores_centrales) <- c("x_m", "y_m")
# -----
# Emisores 4x4 (16 emisores)
# -----
# Coordenadas de los 16 emisores del arreglo completo
emisores_4x4 <- as.data.frame(
  sim_results[[1]]$emitters_4x4
)
colnames(emisores_4x4) <- c("x_m", "y_m")
# -----
# Grilla del marco central
# -----
# Construye la grilla cartesiana del marco evaluado
grilla_central <- expand.grid(
  x_m = sim_results[[1]]$grid$x,
  y_m = sim_results[[1]]$grid$y
)
# Número total de recipientes virtuales

```

```

n_recipientes <- nrow(grilla_central)

# -----

# Lámina acumulada en cada punto (por método)

# -----

# Se combinan las láminas acumuladas de cada método
# en una sola tabla larga

laminas_acumuladas <- purrr::imap_dfr(
  sim_results,
  \(sim, m) {
    sim$Z_long |>
      dplyr::mutate(metodo = m) # identifica el método usado
  }
)

# -----

# Aportes individuales por emisor

# -----

# Tabla larga con:
# (x_rec, y_rec, id_emisor, distancia, aporte, método)

aportes_por_emisor <- purrr::imap_dfr(
  sim_results,
  \(sim, m) {
    sim$aportes_individuales |>
      dplyr::mutate(metodo = m)
  }
)

```

```

}
)
# -----
# Aportes individuales por emisor — EJEMPLO (4 puntos)
# -----
# Coordinadas objetivo de los 4 recipientes
coords_ejemplo <- expand.grid(
  x_m = c(-13.5, 10.5),
  y_m = c(-13.5, 10.5)
)
# Dataframe de ejemplo (4 puntos × 16 emisores)
aportes_por_emisor_ejemplo <- aportes_por_emisor |>
  dplyr::inner_join(
    coords_ejemplo,
    by = c("x_m", "y_m")
  ) |>
  dplyr::arrange(y_m, x_m, id_emisor)
# -----
# 5.4) Tabla resumida de uniformidad
# -----
# Se extraen las métricas hidráulicas finales
# para cada método de simulación
res_tab <- purrr::imap_dfr(

```

```

sim_results,
\\(sim, m) {
  tibble::tibble(
    boquilla_mm = g$boquilla_mm[1],
    presion_bar = g$presion_bar[1],
    metodo      = m,
    sim_type    = sim_type,
    marco       = marco_label,
    sx          = sx,
    sy          = sy,
    CUC         = round(sim$CUC, 2), # coeficiente de uniformidad
    CV          = round(sim$CV, 2),  # coeficiente de variación
    DUlq       = round(sim$DUlq, 2) # uniformidad del cuartil bajo
  )
}
)

# -----
# 5.5) Tabla final consolidada (SOLO RESUMEN)
# -----
# Se combinan métricas hidráulicas y métricas de ajuste
summary_tab <- res_tab |>
  dplyr::left_join(
    metrics_tab,

```

```

    by = c("boquilla_mm", "presion_bar", "metodo")
  ) |>
  dplyr::relocate(
    R2, RMSE, RD, grado_optimo, equation,
    .after = DUlq
  )
# -----
# 6) EXPORT (archivos)
# -----
# Asegurar carpeta de salida
if (!dir.exists(CONFIG$output_dir)) {
  dir.create(CONFIG$output_dir, recursive = TRUE)
}
stamp <- "" # opcional: format(Sys.time(), "%Y%m%d_%H%M%S")
# -----
# 6.1) Rutas de salida
# -----
out_summary_long <- file.path(
  CONFIG$output_dir,
  paste0("Resumen_Uniformidad_Long", stamp, ".csv")
)
out_summary_wide <- file.path(
  CONFIG$output_dir,

```

```

    paste0("Resumen_Uniformidad_Wide", stamp, ".csv")
  )
  out_metrics <- file.path(
    CONFIG$output_dir,
    paste0("Metricas_Kernel_Radial", stamp, ".csv")
  )
# -----
# 6.2) Tabla WIDE (CUC, CV, DUlq por método)
# -----
summary_wide <- summary_tab |>
  dplyr::select(
    boquilla_mm, presion_bar,
    sim_type, marco, sx, sy,
    metodo, CUC, CV, DUlq
  ) |>
  tidyr::pivot_wider(
    names_from = metodo,
    values_from = c(CUC, CV, DUlq)
  )
# -----
# 6.3) Exportación segura
# -----
tryCatch({

```

```

readr::write_csv(summary_tab, out_summary_long)
readr::write_csv(summary_wide, out_summary_wide)
readr::write_csv(metrics_tab, out_metrics)

message("✅ Exportación completada correctamente:")

message("- Resumen largo :", normalizePath(out_summary_long, winslash
= "/"))

message("- Resumen wide :", normalizePath(out_summary_wide, winslash
= "/"))

message("- Métricas kernel: ", normalizePath(out_metrics, winslash = "/"))
}, error = function(e) {
  stop(sprintf(
    "❌ Error durante la exportación de archivos: %s",
    e$message
  ))
})
#
=====
=
# 7) GRÁFICO DE PERFIL RADIAL (MEDICIONES VS f(r))
#
=====
=

```

```

# -----
# Etiqueta boquilla-presión (única)
# -----

crear_etiqueta <- function(b, p) paste0("Boquilla ", b, " mm | Presión ", p, " bar")

etiqueta_actual <- crear_etiqueta(
  df$boquilla_mm[1],
  df$presion_bar[1]
)

df_med <- df |>
  dplyr::mutate(etiqueta = etiqueta_actual)

# -----
# Curvas f(r): spline y polinomio
# -----

df_curvas <- purrr::map_dfr(
  metodos,
  \(m) {
    ker <- get_kernel_cached(df, m)
    r <- seq(0, ker$rmax, by = 0.1)
    tibble::tibble(
      r = r,
      tasa = ker$f(r),
      metodo = m,
      etiqueta = etiqueta_actual
    )
  }
)

```

```

    )
  }
)
# -----
# Rango del gráfico (para anotaciones)
# -----

panel_range <- df_curvas |>
  dplyr::summarise(
    xmin = min(r), xmax = max(r),
    ymin = min(tasa), ymax = max(tasa)
  )
# -----
# Anotaciones de métricas
# -----

df_ann <- metrics_tab |>
  dplyr::mutate(etiqueta = etiqueta_actual) |>
  dplyr::mutate(
    label = sprintf(
      "%s: R2 = %.2f | RMSE = %.2f | RD = %.1f%%",
      ifelse(metodo == "spline", "Spline", "Polinómico"),
      R2, RMSE, RD
    ),
    x = panel_range$xmin + 0.05 * (panel_range$xmax - panel_range$xmin),

```

```

y = panel_range$ymax -
  dplyr::case_when(
    metodo == "spline" ~ 0.10 * (panel_range$ymax - panel_range$ymin),
    metodo == "poly" ~ 0.22 * (panel_range$ymax - panel_range$ymin)
  )
)

# -----
# Ecuación polinómica
# -----

df_eqn <- metrics_tab |>
  dplyr::filter(metodo == "poly", !is.na(equation)) |>
  dplyr::mutate(
    x = panel_range$xmin + 0.05 * (panel_range$xmax - panel_range$xmin),
    y = panel_range$ymin + 0.10 * (panel_range$ymax - panel_range$ymin),
    label = equation
  )

# -----
# Colores
# -----

pal_color <- c(
  spline = "grey50",
  poly = "black"
)

```

```
# -----  
# Gráfico final  
# -----  
g_profile <- ggplot() +  
  geom_line(  
    data = df_curvas,  
    aes(r, tasa, color = metodo),  
    linewidth = 1  
  ) +  
  geom_point(  
    data = df_med,  
    aes(distancia_m, tasa_mm_h),  
    shape = 21, size = 2.5,  
    fill = "black", color = "black", stroke = 0.2  
  ) +  
  geom_text(  
    data = df_ann,  
    aes(x, y, label = label, color = metodo),  
    hjust = 0, vjust = 1,  
    size = 3.3,  
    show.legend = FALSE  
  ) +  
  geom_text(  
    data = df_ann,  
    aes(x, y, label = label, color = metodo),  
    hjust = 0, vjust = 1,  
    size = 3.3,  
    show.legend = FALSE  
  ) +  
  geom_text(  
    data = df_ann,  
    aes(x, y, label = label, color = metodo),  
    hjust = 0, vjust = 1,  
    size = 3.3,  
    show.legend = FALSE  
  ) +
```

```

data = df_eqn,
aes(x, y, label = label),
hjust = 0, vjust = 0,
size = 3.2,
color = pal_color["poly"],
show.legend = FALSE
) +
scale_color_manual("Modelo", values = pal_color) +
labs(
  title = "Perfil radial del aspersor",
  subtitle = etiqueta_actual,
  x = "Distancia radial r (m)",
  y = "Tasa de aplicación (mm h-1)"
) +
theme_minimal(base_size = 11) +
theme(
  legend.position = "bottom",
  panel.grid.minor = element_blank(),
  plot.title = element_text(face = "bold")
)
print(g_profile)
# -----
# Exportación del gráfico

```

```

# -----
if (isTRUE(CONFIG$save_plots)) {
  out_plot <- file.path(
    CONFIG$output_dir,
    paste0("Perfil_radial_", CONFIG$boquilla_mm, "mm_",
          CONFIG$presion_bar, "bar.png")
  )
  ggsave(
    filename = out_plot,
    plot      = g_profile,
    width     = 9,
    height    = 6,
    dpi       = 150
  )
  message("🖼️ Gráfico guardado en: ", normalizePath(out_plot, winslash = "/"))
}
# -----
# 8) MÉTRICAS DE UNIFORMIDAD (solo spline, marco único)
# -----
df_cuc_spline <- summary_tab |>
  dplyr::filter(metodo == "spline") |>
  dplyr::mutate(

```

```
    etiqueta = crear_etiqueta(boquilla_mm, presion_bar)
  )
df_cuc_long <- df_cuc_spline |>
  dplyr::select(etiqueta, marco, CUC, CV, DUIq) |>
  tidyr::pivot_longer(
    cols = c(CUC, CV, DUIq),
    names_to = "metrica",
    values_to = "valor"
  ) |>
  dplyr::mutate(
    metrica = factor(metrica, levels = c("CUC", "CV", "DUIq"))
  )
pal_metr <- c(
  CUC = "#1F77B4",
  CV = "#2CA02C",
  DUIq = "#FF7F0E"
)
g_metrics <- ggplot(df_cuc_long, aes(metrica, valor, fill = metrica)) +
  geom_col(width = 0.7) +
  geom_text(
    aes(label = sprintf("%.1f %%", valor)),
    vjust = -0.4,
    size = 3
  )
```

```

) +
scale_fill_manual(values = pal_metr, guide = "none") +
scale_y_continuous(
  limits = c(0, 100),
  expand = expansion(mult = c(0, 0.05))
) +
labs(
  title = "Métricas de uniformidad del riego",
  subtitle = paste0(df_cuc_spline$etiqueta[1],
    " — Marco ", df_cuc_spline$marco[1]),
  x = NULL,
  y = "Valor (%)"
) +
theme_minimal(base_size = 11) +
theme(
  plot.title = element_text(face = "bold")
)
print(g_metrics)

# Guardado
if (isTRUE(CONFIG$save_plots)) {
  out_plot <- file.path(
    CONFIG$output_dir,
    paste0("Metricas_uniformidad_",

```

```

        CONFIG$boquilla_mm, "mm_",
        CONFIG$presion_bar, "bar.png")
    )
ggsave(
  filename = out_plot,
  plot     = g_metrics,
  width    = 7,
  height   = 5,
  dpi      = 150
)
message(" 📊 Gráfico de métricas guardado en: ",
        normalizePath(out_plot, winslash = "/"))
}
#
=====
=
# 9) MAPA 3D DE DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIÓN
# (marco central, emisores 4x4)
#
=====
=
# -----

```

```

# Paquetes necesarios
# -----

req_pkgs <- c("plotly", "htmlwidgets")

missing <- req_pkgs[!sapply(req_pkgs, requireNamespace, quietly = TRUE)]

if (length(missing))

  stop("✘ Faltan paquetes requeridos: ", paste(missing, collapse = ", "))

suppressPackageStartupMessages(lapply(req_pkgs, library, character.only =
TRUE))

message("✔ Paquetes cargados correctamente.")

# -----

# Selección del método

# -----

method_3d <- "spline"

sim_3d <- sim_results[[method_3d]]

Z <- sim_3d$Z_matrix

gx <- sim_3d$grid$x

gy <- sim_3d$grid$y

Z_mean <- mean(Z, na.rm = TRUE)

Z_max <- max(Z, na.rm = TRUE)

Z_min <- min(Z, na.rm = TRUE)

# -----

# Gráfico 3D (Surface)

```

```

# -----
p3d <- plot_ly(
  x = gx,
  y = gy,
  z = Z,
  type = "surface",
  # Escala de color (opcional pero recomendable)
  colorscale = "YlGnBu",
  showscale = TRUE,
  cmin = Z_min,
  cmax = Z_max
) |>
layout(
  title = sprintf(
    "Distribución espacial de precipitación (3D)<br>
    Boquilla %.0f mm | Presión %.0f bar | Marco %s<br>
    Lámina mínima: %.1f mm/h | Lámina media: %.1f mm/h | Lámina máxima:
%.1f mm/h",
    CONFIG$boquilla_mm,
    CONFIG$presion_bar,
    CONFIG$marco_label,
    Z_min,
    Z_mean,

```

```

    Z_max
  ),
  scene = list(
    xaxis = list(title = "X (m)"),
    yaxis = list(title = "Y (m)"),
    # CONTROL REAL DEL EJE Z
    zaxis = list(
      title = "Lámina acumulada (mm/h)",
      range = c(Z_min, Z_max) # ← AQUÍ se fuerza el mínimo a 0
    )
  )
)
)
print(p3d)
# -----
# Exportar HTML interactivo
# -----
out_dir_3d <- file.path(CONFIG$output_dir, "Mapas3D")
if (!dir.exists(out_dir_3d))
  dir.create(out_dir_3d, recursive = TRUE)
fname_html <- sprintf(
  "Mapa3D_%s_Boq%.0fmm_P%.0fbar_%s.html",
  method_3d,
  CONFIG$boquilla_mm,

```

```

CONFIG$presion_bar,
CONFIG$marco_label
)
htmlwidgets::saveWidget(
  p3d,
  file.path(out_dir_3d, fname_html),
  selfcontained = TRUE
)
message("🌩 Mapa 3D generado correctamente.")
message("📁 Archivo: ",
        normalizePath(file.path(out_dir_3d, fname_html), winslash = "/"))
# -----
# 10) SESSION INFO (opcional)
# -----
session_file <- file.path(CONFIG$output_dir,
"session_info_version_omega.txt")
tryCatch({
  header <- c(
"=====",
  " SESSION INFO — VERSIÓN OMEGA",
"=====",
  sprintf("Fecha ejecución : %s", Sys.time()),

```

```

""
"Configuración principal:",
sprintf(" Boquilla (mm)   : %s", CONFIG$boquilla_mm),
sprintf(" Presión (bar)   : %s", CONFIG$presion_bar),
sprintf(" Marco (m)      : %s × %s (%s)",
        CONFIG$marco_sx, CONFIG$marco_sy, CONFIG$marco_label),
sprintf(" Resolución (m)  : %.2f", CONFIG$res_m),
sprintf(" Emisores       : %s", CONFIG$Num_emisores),
sprintf(" Métodos kernel  : spline, polinómico"),
""
"-----",
"SessionInfo()",
"-----",
""
)
writeLines(
  c(header, capture.output(sessionInfo())),
  con = session_file
)
message(" 📄 session_info_version_omega.txt guardado correctamente.")
}, error = function(e) {

```

```
message("⚠ No se pudo guardar session_info_version_omega.txt: ",
e$message)
})
message(
  "❏ Script completado exitosamente.\n",
  "summary_tab contiene CUC, CV y DUlq por:\n",
  " • boquilla\n",
  " • presión\n",
  " • método (spline / polinómico)\n",
  " • arreglo de emisores (4×4)\n",
  " • marco de aspersion\n",
  "incluyendo métricas de ajuste del kernel radial."
)
```

8.4. Métricas de ajuste de los modelos de kernel radial

Tabla 7. Coeficiente de determinación (R^2) y error cuadrático medio (RMSE) obtenidos para los modelos spline monótono y polinómico en la modelación de las curvas de distribución radial del agua, para cada combinación de boquilla y presión de operación.

Boquilla (mm)	Presión (bar)	Modelo de ajuste	R^2	RMSE (mm h ⁻¹)
14	2	Polinómico	0,94	0,594
		Spline	0,99	0,264
	3	Polinómico	0,97	0,480
		Spline	0,99	0,230
	4	Polinómico	0,97	0,511
		Spline	1,00	0,144
16	2	Polinómico	0,96	0,631
		Spline	1,00	0,085
	3	Polinómico	0,98	0,390
		Spline	1,00	0,110
	4	Polinómico	0,96	0,566
		Spline	1,00	0,111
18	2	Polinómico	0,94	0,700
		Spline	0,99	0,335
	3	Polinómico	0,82	0,935
		Spline	0,86	0,851
	4	Polinómico	0,94	0,884
		Spline	1,00	0,210