

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

MODELACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL BULBO DE MOJADO EN RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL

TESIS DE GRADO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA



PRESENTA:

IROURI CRISTÓBAL MUÑOZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2022

MODELACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL BULBO DE MOJADO EN RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL

Tesis realizada por **IROURI CRISTÓBAL MUÑOZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA

Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:

OR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ

ASESOR:

DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

ASESOR:

DR. AGUSTÍN RUIZ GARCÍA

CONTENIDO

RESUMEN GENERAL xv	ii
1 INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Objetivo general	4
1.2 Objetivos específicos	4
1.3 Estructura de la Tesis	4
1.4 Literatura citada	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1 Modelos matemáticos en la estimación de los patrones de	
humedecimiento	8
2.2 Clasificación de los modelos matemáticos en la estimación de los	
patrones de humedecimiento.	9
2.3 Modelos empíricos en la estimación de la geometría del bulbo de mojado	
	0
2.4 Medición de la geometría del bulbo de mojado 1	1
2.5 Literatura citada 1	2
3 MEDICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR	
GOTEO CON VISIÓN ARTIFICIAL 1	5
3.1 Resumen 1	6
3.2 Introducción 1	8
3.3 Materiales y Métodos 1	9
3.4 Resultados y Discusión2	1
3.5 Conclusiones 2	2
3.6 Literatura citada 2	2
4 OPTIMIZACIÓN DE LA REPRESENTACIÓN DEL AVANCE DE	
HUMEDECIMIENTO EN RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL A PARTIR DEL	
NÚMERO DE SENSORES Y SU SEPARACIÓN 2	4

F	Resumen	25
I	ntroducción	26
Ν	Aaterial y metodología	27
F	Resultados y discusión	30
C	Conclusiones	31
F	Referencias bibliográficas	31
5 A	APLICACIÓN DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES EN LA MEDICIÓ	ŹΝ
DE	LAS DIMENSIONES DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO	
SU	PERFICIAL	33
F	Resumen	35
I	ntroducción	36
Ν	Aateriales y métodos	39
F	Resultados y discusión	41
C	Conclusiones	44
L	iteratura citada	44
6 A	AN IMPROVED EMPIRICAL MODEL FOR ESTIMATING THE GEOMETRY	Y
OF	THE SOIL WETTING FRONT WITH SURFACE DRIP IRRIGATION	47
A	Abstract:	48
1	. Introduction	48
2	2. Materials and Methods	50
	2.1. Experimental Site	50
	2.2. Characteristics of the Experimental Soils	50
	2.3. Experimental System	51
	2.4. Experimental Trials	53
	2.5. Soil Drying after Irrigations	54
	2.6. Proposed Empirical Model	55
	2.7. Evaluated Models	55

3. Results	57
3.1. Wetting Patterns Geometry	57
3.2. Model Performance	59
3.3. Effect of Input Parameters on Model Response	65
4. Discussion	66
4.1. Wetting Patterns Geometry	66
4.2. Model Performance	67
4.3. Effect of Input Parameters on the Model Response	68
5. Conclusions	69
References	70
7 ANEXOS	72

LISTA DE CUADROS

5 APLICACIÓN DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES EN LA MEDICIÓN
DE LAS DIMENSIONES DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO
SUPERFICIAL
Cuadro 1. Indicadores estadísticos usando trainIm y learngdm 41
Cuadro 2. Indicadores estadísticos de las ANN en el entrenamiento 42
Cuadro 3. Indicadores estadísticos de las ANN (trainIm) en la evaluación 43
Cuadro 4. Indicadores estadísticos de las ANN (trainlm) en la prueba
práctica
6 AN IMPROVED EMPIRICAL MODEL FOR ESTIMATING THE GEOMETRY
OF THE SOIL WETTING FRONT WITH SURFACE DRIP IRRIGATION 47
Table 1. Physical properties of the study soils. 51
Table 2. Hydraulic parameters of the experimental soils obtained with the
ROSETTA version 1.2 software package [30] 51
Table 3. Characteristics of the moderate- and long-duration irrigations of the
first experimental block54
Table 4. Characteristics of the short-duration irrigations of the second
experimental block 54
Table 5. Validity ranges of the evaluated models. 56
Table 6. Statistical indicators of the empirical models for the first irrigation
block for the width (d) and depth of the wetting front (z)60
Table 7. Statistical indicators of the empirical models for the second irrigation
block, with an emitter discharge rate of 4 I h^{-1} , for the width (d) and depth of
the wetting front (z)61

Table 8. Statistical indicators of the empirical models for the second irrigation	٦
block, with an emitter discharge rate of 3 I h^{-1} , for the width (d) and depth of	
the wetting front (z)	51

LISTA DE FIGURAS

3 MEDICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR	
GOTEO CON VISIÓN ARTIFICIAL	15
Figura 1. Sistema experimental propuesto.	19
Figura 2. Identificación del bulbo húmedo.	20
Figura 3. Medición de las dimensiones de mojado	21
4 OPTIMIZACIÓN DE LA REPRESENTACIÓN DEL AVANCE DE	
HUMEDECIMIENTO EN RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL A PARTIR DE	L
NÚMERO DE SENSORES Y SU SEPARACIÓN	24
Figura 1: Representación gráfica de la distribución del contenido de humed	ad
del suelo en riego por goteo subsuperficial (Fuente: Kandelous <i>et al.</i> , 2011).	
	26
Figura 2: Calibración HYDRUS-1D	27
Figura 3: Representaciones gráficas de un solo escenario físico	28
Figura 4: Posicionamiento de los sensores de humedad del suelo dentro de	el
modelo físico de paredes transparentes	28
Figura 5: Espacio de estudio y posicionamiento de los sensores en las	
simulaciones de riego	29
Figura 6: Comportamiento del mejor modelo matemático obtenido	31
5 APLICACIÓN DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES EN LA MEDICIÓ	ĴΝ
DE LAS DIMENSIONES DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO	
SUPERFICIAL	33
Figura 1. Representación esquemática de una neurona biológica (a) y una	
neurona artificial (b)	38
Figura 2: Arquitectura típica de un Perceptrón Multicapa	39
Figura 3: Sistema experimental con acotaciones en centímetros	40

Figura 4: Mediciones versus simulaciones con las ANN óptimas en la prueba
práctica
Figura 5: Arquitectura de la red óptima para la predicción de la profundidad
de mojado (trainIm y learngd)44
Figura 6: Arquitectura de la red óptima para la predicción del ancho de
mojado (trainlm y learngdm) 44
6 AN IMPROVED EMPIRICAL MODEL FOR ESTIMATING THE GEOMETRY
OF THE SOIL WETTING FRONT WITH SURFACE DRIP IRRIGATION 47
Figure 1. Experimental system 52
Figure 2. Observation wall of the wetting front
Figure 3. Marking of the wetting front on the observation wall of the soil
container54
Figure 4. Geometry of the wetting front as a function of irrigation time in the
first irrigation block
Figure 5. Geometry of the wetting front as a function of irrigation time in the
second irrigation block
Figure 6. Temporal evolution of the width and depth of the wetting front of
(a , b) irrigation 1A (q = 2.90 I h ⁻¹ and $\theta_i = 0.07$ cm ³ cm ⁻³) and (c , d) irrigation 2A
$(q = 2.90 \text{ I } h^{-1} \text{ and } \theta_i = 0.23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3})$
Figure 7. Temporal evolution of the width and depth of the wetting front of
(a , b) irrigation 3A (q = 3.75 I h ⁻¹ and $\theta_i = 0.24$ cm ³ cm ⁻³) and (c , d) irrigation 4A
$(q = 1.44 \text{ I } h^{-1} \text{ and } \theta_i = 0.14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3})$
Figure 8. Temporal evolution of the width and depth of the wetting front of
(a , b) irrigation 1B (q = 4.00 I h ⁻¹ and $\theta_i = 0.09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), (c , d) irrigation 3B (q
= 4.00 I h ⁻¹ and θ_i = 0.10 cm ³ cm ⁻³), and (e , f) irrigation 5B (q = 4.00 I h ⁻¹ and
$\theta_i = 0.13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)
Figure 9. Temporal evolution of the width and depth of the wetting front of
(a , b) irrigation 2B (q = 3.00 I h ⁻¹ and θ_i = 0.13 cm ³ cm ⁻³), (c , d) irrigation 4B (q

= 3.00 I h ⁻¹ and θ_i = 0.09 cm ³ cm ⁻³), and (e , f) irrigation 6B (q = 3.00 I h ⁻¹ and
$\theta_i = 0.07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)
Figure 10. Effect of input parameters on the response of the proposed models
for (a) width and (b) depth of the wetting front
7 ANEXOS
Figura 1. Primera hoja de la solicitud de registro de Patente
Figura 2. Segunda hoja de la solicitud de registro de Patente
Figura 3. Tercera hoja de la solicitud de registro de Patente
Figura 4. Quinta hoja de la solicitud de registro de Patente
Figura 5. Octava hoja de la solicitud de registro de Patente
Figura 6. Novena hoja de la solicitud de registro de Patente
Figura 7. Décima hoja de la solicitud de registro de Patente
Figura 8. Décimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente
Figura 9. Décimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente
Figura 10. Décimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente
Figura 11. Décimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente 82
Figura 12. Décimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente 83
Figura 13. Décimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente 84
Figura 14. Vigésima hoja de la solicitud de registro de Patente
Figura 15. Vigésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente 86
Figura 16. Vigésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente 87
Figura 17. Vigésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente 88
Figura 18. Vigésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente 89
Figura 19. Vigésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente 90
Figura 20. Vigésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente91
Figura 21. Vigésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente 92
Figura 22. Vigésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente 93
Figura 23. Vigésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente 94

Figura 25. Trigésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente. 96 Figura 26. Trigésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente.... 97 Figura 27. Trigésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente. 98 Figura 28. Trigésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente....... 99 Figura 29. Trigésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente..... 100 **Figura 30**. Trigésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente...... 101 Figura 31. Trigésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente... 102 Figura 32. Trigésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente. 103 Figura 33. Trigésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente.... 104 **Figura 34**. Cuadragésima hoja de la solicitud de registro de Patente....... 105 Figura 35. Cuadragésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente. Figura 36. Cuadragésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente. Figura 37. Cuadragésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente. Figura 38. Cuadragésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente. Figura 39. Cuadragésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente. Figura 40. Cuadragésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente. Figura 41. Cuadragésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente. Figura 42. Cuadragésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente.

Figura 43.	Cuadragésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente.
Figura 44.	Quincuagésima hoja de la solicitud de registro de Patente 115
Figura 45.	Quincuagésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente.
Figura 46.	Quincuagésimo segunda hoja de la solicitud de registro de
Patente	
Figura 47.	Quincuagésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente.
Figura 48.	Quincuagésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente.
-	
Figura 49.	Quincuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente.
-	
Figura 50.	Quincuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.
J	
Figura 51.	Quincuagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente.
	122
Figura 52	Quincuagésimo octava hoia de la solicitud de registro de Patente
rigula 02.	123
Figura 53	Oujocuaçásimo novena boja de la solicitud de registro de Patente
i igula 55.	
Eigura 54	Sovagósima boja do la solicitud do registro do Patonto 125
Figura 54.	Sexagésima noja de la solicitud de registro de Patente
Figura 55.	Sexagesino primera noja de la solicitud de registro de Paterite.
Figura 56.	Sexagesimo segunda noja de la solicitud de registro de Patente.
Figura 57.	Sexagesimo tercera noja de la solicitud de registro de Patente. 128

Figura 59 . Sexagesimo quinta noja de la solicitud de registro de Patente 130
Figura 60. Sexagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente 131
Figura 61. Sexagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente.
Figura 62. Sexagésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente. 133
Figura 63 . Sexagésimo novena hoia de la solicitud de registro de Patente. 134
Figura 64 . Septuagésima hoja de la solicitud de registro de Patente
Figura 65 . Septuagésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente.
Figura 66. Septuagésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente.
137
Figura 67 . Septuagésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente.
138
Figura 68. Sentuagésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente
130
Eigura 69. Soptuagósimo quinta boia do la solicitud do rogistro do Patonto
Figura 69. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente.
139 Figura 69. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente. 140 Figura 70. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Datente 111
139 Figura 69. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente. 140 Figura 70. Septuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.141 Figura 71. Septuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.141
 139 Figura 69. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente. 140 Figura 70. Septuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente. 141 Figura 71. Septuagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente.
139 Figura 69. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente. 140 Figura 70. Septuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.141 Figura 71. Septuagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente. 142
139 Figura 69. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente. 140 Figura 70. Septuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.141 Figura 71. Septuagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente. 142 Figura 72. Septuagésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente.
139 Figura 69. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente. 140 Figura 70. Septuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.141 Figura 71. Septuagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente. 142 Figura 72. Septuagésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente. 143
139 Figura 69. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente. 140 Figura 70. Septuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente. 141 Figura 71. Septuagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente. 142 Figura 72. Septuagésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente. 143 Figura 73. Septuagésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente.
139 Figura 69. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente. 140 Figura 70. Septuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente. 141 Figura 71. Septuagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente. 142 Figura 72. Septuagésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente. 143 Figura 73. Septuagésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente. 144
139 Figura 69. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente. 140 Figura 70. Septuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente. 141 Figura 71. Septuagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente. 142 Figura 72. Septuagésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente. 143 Figura 73. Septuagésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente. 144 Figura 74. Octagésima hoja de la solicitud de registro de Patente.
139 Figura 69. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente. 140 Figura 70. Septuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente. 141 Figura 71. Septuagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente. 142 Figura 72. Septuagésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente. 143 Figura 73. Septuagésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente. 144 Figura 74. Octagésima hoja de la solicitud de registro de Patente. 145 Figura 75. Octagésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente.
139 Figura 69. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente. 140 Figura 70. Septuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente. 141 Figura 71. Septuagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente. 142 Figura 72. Septuagésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente. 143 Figura 73. Septuagésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente. 144 Figura 74. Octagésima hoja de la solicitud de registro de Patente. 144 Figura 75. Octagésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente. 145 Figura 76. Octagésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente.

Figura 77. Octagésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente. 148
Figura 78. Octagésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente 149
Figura 79. Octagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente 150
Figura 80. Octagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente 151
Figura 81. Octagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente.152
Figura 82. Octagésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente 153
Figura 83. Octagésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente. 154
Figura 84. Nonagésima hoja de la solicitud de registro de Patente 155
Figura 85. Nonagésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente.

Figura 86. Nonagésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente.
157
Figura 87. Nonagésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente. 158
Figura 88. Nonagésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente. 159

DEDICATORIAS

A Dios por todas las bendiciones y pruebas que me ha brindado a lo largo de la vida.

A mis padres David Cristóbal Acevedo y Edith Muñoz Ibarra dedicado de todo corazón. Por el ejemplo, amor, apoyo, confianza y cariño brindado incondicionalmente a lo largo de mi vida. Ustedes constantemente me motivan a ser mejor persona.

A mis hermanos Yasunari y David por su ejemplo, apoyo y amor.

A mi novia Ana Elizabeth Paredes Cervantes por su compañía, apoyo y amor.

A mi mejor amigo José Antonio Ramírez Flores que desde el cielo me apoya y me motiva a ser mejor persona cada día.

A cada uno de mis profesores que contribuyeron en mi formación como individuo y profesionista.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por darme la oportunidad y los medios para llevar a cabo mi formación profesional, estaré eternamente agradecido y al servicio de la Universidad.

Al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua y a la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría, además del financiamiento otorgado para la investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca recibida de estudios de posgrado.

Al Dr. J. Víctor Prado Hernández por su amistad, confianza, consejos, tiempo y apoyo incondicional en la dirección del presente trabajo.

A los doctores Mario Alberto Vázquez Peña y Agustín Ruiz García por su tiempo, conocimientos y apoyo, además de sus valiosas sugerencias y aportaciones en el desarrollo del presente trabajo.

A los doctores con quienes tomé cursos y/o realizaron aportaciones en el desarrollo del presente trabajo.

A mis padres por el apoyo para el desarrollo del presente trabajo y por inculcarme la importancia del estudio.

A la Coordinación de Posgrado de IAUIA, especialmente a Mayra por su tiempo y ayuda en gestiones y trámites necesarios dentro del posgrado.

A mis compañeros de posgrado Joshua, Pedro, Ramón, Cynthia, Juan Gabriel, Facundo, Víctor Hugo y Canek, por su ayuda y amistad.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre:	Irouri Cristóbal Muñoz
Fecha de nacimiento:	25 de febrero de 1996
Lugar de nacimiento:	Texcoco, Estado de México, México
Cédula profesional:	11989378
Desarrollo académico	
Bachillerato:	Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México
Licenciatura:	Ingeniería en Irrigación, Universidad Autónoma

Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

RESUMEN GENERAL

MODELACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL BULBO DE MOJADO EN RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL

En México y en el mundo, se requiere que la agricultura produzca una mayor cantidad de alimentos con menos agua y fertilizantes. El riego por goteo es una excelente opción para enfrentar esta exigencia, pero son necesarios ciertos conocimientos y experiencias para obtener el máximo beneficio de esta técnica de aplicación de riego, donde la modelación matemática juega un papel importante en la optimización del diseño y operación del riego por goteo. El objetivo general fue modelar matemáticamente la geometría del bulbo de mojado en riego por goteo superficial, con base en la optimización de la medición de dicha geometría, y de la generación y evaluación de modelos matemáticos empíricos. Para las pruebas experimentales se utilizó un sistema de riego por goteo superficial con un emisor instalado en un cubo de acrílico cristal lleno de suelo, en condiciones similares de riego en campo. En las pruebas experimentales se consideraron distintas condiciones de operación de riego y distintas características del suelo: se consideraron varios caudales de emisor y tiempos de riego; y diferentes texturas de suelo, humedades iniciales, densidades aparentes y porcentajes de materia orgánica. Como resultado de la optimización de la medición: se inventó un sistema de visión artificial para obtener la geometría del bulbo de mojado de una manera automatizada de forma fácil y eficiente; y se obtuvo la cantidad mínima de sensores de medición de humedad del suelo y su separación para representar adecuadamente el avance del frente de humedecimiento. Se generaron y evaluaron Redes Neuronales Artificiales y un nuevo modelo empírico mejorado para la estimación de la evolución temporal del radio y la profundidad del frente de humedecimiento en función del caudal del emisor y de las características del suelo, cuyos resultados son entre buenos y muy buenos según el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe.

Palabras clave: Bulbo húmedo, frente de humedecimiento, modelación del riego, agua en el suelo, operación y diseño de riego.

Tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Irouri Cristóbal Muñoz

Director de Tesis: Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

GENERAL ABSTRACT

MODELING OF THE WETTED BULB GEOMETRY IN SURFACE DRIP IRRIGATION

In Mexico and in the world, agriculture is required to produce a greater amount of food with less water and fertilizers. Drip irrigation is an excellent option to meet this requirement, but certain knowledge and experience are necessary to obtain the maximum benefit from this irrigation application technique, where mathematical modeling plays an important role in optimizing the design and operation of drip irrigation. The general objective was to mathematically model the wetted bulb geometry in surface drip irrigation, based on the optimization of the measurement of said geometry, and the generation and evaluation of empirical mathematical models. For the experimental tests, a surface drip irrigation system was used with an emitter installed in a crystal acrylic cube filled with soil, under similar conditions to field irrigation. In the experimental tests, different irrigation operating conditions and different soil characteristics were considered: various emitter flows and irrigation times were considered; and different soil textures, initial moisture, bulk densities and percentages of organic matter. As a result of the optimization of the measurement: an artificial vision system was invented to obtain the wetted bulb geometry in an automated, easy and efficient way; and the minimum number of soil moisture measurement sensors and their separation was obtained to adequately represent the advance of the wetting front. Artificial Neural Networks and a new improved empirical model were generated and evaluated for the estimation of the temporal evolution of the radius and the depth of the wetting front as a function of the emitter flow rate and the characteristics of the soil, whose results are between good and very good according to the Nash and Sutcliffe efficiency index.

Keywords: Wetted bulb, wetting front, irrigation modeling, water in soil, operation and design of irrigation.

Master's Thesis in Agricultural Engineering and Integrated Water Use

University of Chapingo

Author: Irouri Cristóbal Muñoz

Thesis Advisor: Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

La agricultura es la actividad con mayor consumo de agua en el mundo, en la producción de alimentos se emplea alrededor del 70% del agua que se extrae de las diversas fuentes. Para satisfacer la creciente demanda de alimentos a nivel mundial en 2030, se requiere incrementar la producción de alimentos en un 50%. Además, en el mundo y en México la eficiencia del uso del agua en la agricultura es muy baja, por lo general menor al 50% (Martínez-Austria, 2013). La tecnología de riego por goteo puede ser una excelente opción para enfrentar esta problemática, debido a su alta eficiencia, optimización de la aplicación de fertilizantes, aumento del rendimiento y calidad de los cultivos, entre otros beneficios (Shock & Welch, 2013).

Subbaiah (2013) menciona que la técnica de aplicación del riego por goteo ha sido estudiada y empleada en muchos lugares del mundo, para optimizar los beneficios que ofrece esta forma de aplicación del riego son necesarios diferentes conocimientos y experiencias. Con esta técnica, el agua se conduce hasta la planta y es entregada puntualmente al suelo con emisores de baja presión, minimizando las pérdidas por conducción y anulando las pérdidas por coleos y con potencial de minimizar las pérdidas por percolación profunda y evaporación (Camp, 1998).

En tiempos recientes se han visto grandes avances en el diseño, tecnología y operación de los sistemas de riego por goteo, esto se debe mayormente a una mejor comprensión del movimiento del agua en el suelo (Ainechee et al., 2009). La geometría del bulbo de mojado en el suelo es uno de los aspectos con mayor importancia a considerar en el diseño y operación del riego por goteo (Moncef et al., 2002), pues con dicha información se puede determinar el espaciamiento óptimo entre emisores para cubrir el sistema radicular de la planta, entre otras aplicaciones (Skaggs et al., 2004).

El conocimiento de la geometría del bulbo de mojado en riego por goteo permite ubicar adecuadamente el emisor o emisores, logrando que la planta pueda consumir agua y nutrientes de una manera eficiente, con menores costos por labores culturales y mayores ingresos por el aumento del rendimiento (Amin & Ekhmaj, 2006; Skaggs et al., 2010). Para diseño y operación de sistemas de riego por goteo, la geometría del bulbo de mojado puede ser definida de una manera práctica por su ancho en la superficie del suelo y su profundidad (Al-Ogaidi et al., 2015).

La distribución del agua del bulbo de mojado generado por un emisor se puede obtener por tres medios: a través de mediciones en experimentos in situ, con mediciones en modelos físico experimentales en laboratorio, y con el uso de modelos matemáticos (Cruz-Bautista et al., 2016). Los modelos matemáticos se pueden clasificar en tres grupos principales: numéricos, analíticos y empíricos (Kandelous & Šimůnek, 2010). En cualesquiera de los modelos matemáticos, es indispensable su evaluación para conocer su alcances y limitaciones.

Los modelos matemáticos más complejos son aquellos basados en la ecuación de Richards, resultado de la aplicación del principio de conservación de la masa en un volumen de suelo parcialmente saturado (Subbaiah, 2013). La alta no linealidad de dicha ecuación, impide su solución analítica, por lo que se recurre a métodos numéricos para su solución. Su solución requiere la definición de condiciones de inicio, condiciones límites e información detallada de meteorología, suelo y cultivo, y un considerable poder computacional lo que puede limitar su aplicación práctica (Zur, 1996). Los modelos analíticos suelen derivarse de la ecuación de Richard, aplicando hipótesis simplificadoras, como la ecuación de Green y Ampt (Chu, 1994). Mientras que los modelos empíricos se benefician de su simplicidad, al tener parámetros más comprensibles para los técnicos del riego y que suelen ser fáciles de obtener, por lo que, son más convenientes para ser utilizados en aplicaciones de campo (Amin & Ekhmaj, 2006; Moncef & Khemaies, 2016).

Cristóbal-Muñoz et al. (2022) mencionan que algunos modelos matemáticos generados a partir de investigaciones realizadas en campo y laboratorio, muestran limitaciones en sus alcances pues ofrecen pocos detalles metodológicos de los experimentos, tales como: no se describen las características de los suelos o no se indican los procedimientos para sus determinaciones, no se aclaran las condiciones de riego, y no se explica con precisión la forma de la medición del contenido del agua en el suelo y del frente de avance del bulbo de mojado.

Otra problemática importante en el modelado de la geometría del bulbo de mojado es cómo se obtiene la información experimental, ya que esta información es necesaria para generar o evaluar los modelos matemáticos. En la actualidad existen diferentes métodos o formas para medir la geometría del bulbo de mojado en riego por goteo, pero la medición de alta frecuencia de la evolución espacio-temporal de la geometría del bulbo de mojado con estos métodos no es una opción, además de existir otras limitantes particulares dependiendo del método que se utilice (Júnior et al., 2016).

Los modelos numéricos, analíticos y empíricos tienen sus ventajas y desventajas respectivamente (Subbaiah, 2013). El desarrollo de nuevos conocimientos y experiencias en el campo del modelado de la geometría del bulbo de mojado está en un constante proceso de mejora, donde son necesarias investigaciones y estudios novedosos, tratando de optimizar las limitaciones y bondades de los modelos matemáticos, reportando la metodología y los resultados alcanzados de las investigaciones de una manera clara y precisa.

La presente Tesis se realizó bajo la hipótesis de que es posible realizar nuevos aportes en cómo se obtiene la información de la evolución temporal de la geometría del bulbo de mojado en campo y en laboratorio, además de que es posible realizar nuevos aportes al conocimiento actual de la modelación matemática de la evolución temporal de la geometría del bulbo de mojado, incorporando distintas características de operación y del suelo, que podrían apoyar en la optimización del diseño y operación del riego por goteo superficial.

1.1 Objetivo general

Modelar matemáticamente la geometría del bulbo de mojado en riego por goteo superficial.

1.2 Objetivos específicos

- Optimizar la medición de la geometría del bulbo de mojado en riego por goteo a partir de la invención de un sistema de visión artificial automatizado.
- Optimizar la medición de la geometría del bulbo de mojado en riego por goteo superficial a partir de la optimización de la representación del frente de humedecimiento en función del número de sensores de humedad del suelo y su separación.
- Modelar la geometría del bulbo de mojado en riego por goteo superficial a partir de la generación e implementación de Redes Neuronales Artificiales para la estimación de las dimensiones de mojado.
- Modelar la geometría del bulbo de mojado en riego por goteo superficial a partir de la generación de un nuevo modelo matemático empírico para la estimación de las dimensiones de mojado, además de evaluar el desempeño del modelo propuesto y compararlo con otros modelos empíricos.

1.3 Estructura de la Tesis

La presente Tesis se divide en seis capítulos: El primer capítulo corresponde a una introducción general; el segundo capítulo es el estado del arte de la modelación matemática de la geometría del bulbo de mojado en riego por goteo; el tercer capítulo es sobre un sistema de visión artificial para medir la geometría del bulbo de mojado; el cuarto capítulo es acerca de la optimización de las representaciones graficas del avance de humedecimiento en riego por goteo superficial, a partir del número de sensores de humedad del suelo y su separación; el quinto capítulo es sobre la generación e implementación de Redes Neuronales Artificiales en la estimación de la geometría del bulbo de mojado en riego por goteo superficial; el sexto capítulo es la generación de un nuevo modelo matemático empírico para la estimación de la geometría del bulbo de mojado, además de evaluar el desempeño del modelo propuesto y compararlo con otros modelos empíricos.

Para el tercer capítulo de la presente Tesis la descripción fue lo más breve posible, debido a que antes de la publicación de la presente Tesis, se realizó una publicación previa y se inició el trámite de solicitud de registro de Patente ante el INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL (IMPI). El objetivo de lo anterior fue el de no generar controversias o aspectos que puedan entorpecer y retrasar el proceso de registro de Patente. Para mayor información favor de revisar la primera página del tercer capítulo, además de revisar la solicitud de registro de Patente que se encuentra en la sección de Anexos (Figuras 1-88).

1.4 Literatura citada

- Ainechee, G., Boroomand-Nasab, S., & Behzad, M. (2009). Simulation of soil wetting pattern under point source trickle irrigation. *Journal of Applied Sciences*, 9(6), 1170-1174. DOI: 10.3923/jas.2009.1170.1174
- Al-Ogaidi, A. A., Wayayok, A., Kamal, M. R., & Abdullah, A. F. (2015). A modified empirical model for estimating the wetted zone dimensions under drip irrigation. *Jurnal Teknologi*, 76(15). DOI: 10.11113/jt.v76.5954
- Amin, M. S., & Ekhmaj, A. I. (2006). DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. In 7th International micro irrigation congress (Vol. 1016).
- Camp, C. R. (1998). Subsurface drip irrigation: A review. *Transactions of the* ASAE, 41(5), 1353. DOI: 10.13031/2013.17309

- Chu, S. T. (1994). Green-Ampt analysis of wetting patterns for surface emitters. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 120(2), 414-421. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1994)120:2(414)
- Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Martínez-Ruiz, A., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., & Cristóbal-Muñoz, D. (2022). An Improved Empirical Model for Estimating the Geometry of the Soil Wetting Front with Surface Drip Irrigation. *Water*, 14(11), 1827. DOI: 10.3390/w14111827
- Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., & Siller-González, M. (2016). Validación de un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo con riego por goteo. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(1), 45-55.
- Júnior, J. A., Bandaranayake, W. M., & Syvertsen, J. (2016). Drip irrigation wetting patterns in a mid Florida sandy soil. *IRRIGA*, 1(01), 1-1. DOI: 10.15809/irriga.2016v1n01p1-25
- Kandelous, M. M., & Šimůnek, J. (2010). Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, 28(5), 435-444. DOI: 10.1007/s00271-009-0205-9
- Martínez-Austria, P. F. (2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(5), 165-180.
- Moncef, H., Hedi, D., Jelloul, B., & Mohamed, M. (2002). Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: theory and numerical aspect. Irrigation and Drainage: *The Journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 51(4), 347-360. DOI: 10.1002/ird.60
- Moncef, H., & Khemaies, Z. (2016). An analytical approach to predict the moistened bulb volume beneath a surface point source. *Agricultural Water Management*, 166, 123-129. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.12.020
- Shock, C. C., & Welch, T. (2013). El riego por goteo: Una introducción. *Técnicas para la Agricultura Sostenible*, EM 8782-S, 1-9.
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., Šimůnek, J., & Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 130(4), 304-310.
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., & Rothfuss, Y. (2010). Drip irrigation water distribution patterns: effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water. Soil *Science Society of America Journal*, 74(6), 1886-1896.
- Subbaiah, R. (2013). A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*, 31(3), 225-258.
- Zur, B. (1996). Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Irrigation Science*, 16(3), 101-105.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

A medida que aumenta la contaminación de los cuerpos de agua, la población y la demanda de agua en las ciudades, a la agricultura se le exige producir más alimentos usando menos agua sin degradar los recursos hídricos y del suelo. La tecnología de riego por goteo puede ayudar a enfrentar este desafío otorgando a los productores un mayor control sobre la aplicación de agua, fertilizantes y pesticidas, al mismo tiempo que se protege el medio ambiente (Kandelous & Simunek, 2010; Subbaiah & Mashru, 2013). Con esta técnica de riego, el agua se conduce a baja presión a una red de salidas estrechamente espaciadas que descargan el agua lentamente, además se tiene la ventaja de aplicar el agua de riego con precisión en cantidad y ubicación, dando mayores ganancias debido a la reducción de agua, fertilizantes y costos culturales, aumentando los ingresos debido a un mayor rendimiento (Subbaiah & Mashru, 2013).

El conocimiento de los patrones de humedecimiento en riego por goteo para diferentes suelos y condiciones de riego se utiliza para un diseño y operación eficientes, para asegurar la correcta cantidad y localización del agua y fertilizantes en la zona radicular activa, para establecer la programación del riego y para sincronizar el patrón de humedecimiento con el patrón de enraizamiento del cultivo (Kandelous & Simunek, 2010; Subbaiah, 2013). El desconocimiento sobre las variaciones espaciales y temporales del patrón de humedecimiento en el suelo, resulta en un manejo por de bajo del óptimo y una baja eficiencia en el uso del agua en los sistemas de riego por goteo (Hillel, 1988; Lubana & Narda, 2001).

La forma y la distribución de humedad en el perfil del suelo varían por diversos factores, como lo son caudales, espaciamiento y ubicación del emisor, propiedades hidráulicas del suelo, cantidad y frecuencia de riego, condiciones iniciales de humedad en el suelo y entre otros factores (Bresler, 1977; Naglič et al., 2014; Al-Ogaidi et al., 2015). La información del avance de humedecimiento

vertical como la horizontal son importantes, además se debe tener una noción del comportamiento bidimensional en conjunto de las dos dimensiones de mojado. Antes de diseñar cualquier sistema de riego por goteo es necesario investigar el comportamiento del patrón de humedecimiento en el perfil del suelo (Bresler et al., 1971).

2.1 Modelos matemáticos en la estimación de los patrones de humedecimiento.

El patrón de humedecimiento en riego por goteo se puede obtener por medición directa de la humedad del suelo en campo. Sin embargo, se debe tener precaución al medir directamente la humedad del suelo, ya que las condiciones del sitio de estudio, tales como la compactación o las condiciones superficiales del suelo, pueden ser bastantes específicas, además la instalación de instrumentos de medición puede afectar los patrones de humedecimiento que se pretenden medir (Thorburn et al., 2003; Subbaiah, 2013). También existen otros problemas si no se cuenta con el equipo adecuado que evite hacer excavaciones en los sitios de observación de los experimentos en campo (Cristóbal-Muñoz et al., 2022). Por lo tanto, los investigadores adoptaron modelos matemáticos para describir la infiltración desde una fuente puntual/lineal, estos modelos pueden ser utilizados para diseño y operación de sistemas de riego por goteo (Lubana & Narda, 2001). Los modelos matemáticos tienen varias ventajas sobre otras técnicas de estimación (Ravi et al., 1998):

- Los modelos matemáticos son relativamente fáciles de usar.
- Los modelos que simulan el componente de infiltración, incorporan conceptos ampliamente aceptados de la física del suelo (excepto para los modelos empíricos).
- Los parámetros de entrada requeridos se pueden obtener fácilmente de la literatura, así como de bases de datos.

- No es necesaria la medición específica del sitio para obtener estimaciones preliminares de flujo de agua, aunque se recomienda.
- La variabilidad espacial de los parámetros del suelo puede tenerse en cuenta en los modelos de forma determinista o estadística.
- Las soluciones analíticas pueden ser útiles para establecer la validez y exactitud de la diferencia finita o enfoques del elemento finito.
- Ayudar en gran medida en el diseño y análisis de experimentos de campo, además en la determinación de los más importantes procesos y propiedades que afectan el desempeño de un sistema de riego por goteo.

2.2 Clasificación de los modelos matemáticos en la estimación de los patrones de humedecimiento.

Los modelos matemáticos más comunes son los modelos numéricos, analíticos y empíricos (Al-Ogaidi et al., 2016; Shiri et al., 2020). Generalmente los modelos analíticos y numéricos se desarrollan basados en la solución de la ecuación de Richards (1931) para flujo no saturado. Las soluciones analíticas a la ecuación de Richards incluyen soluciones de estado estacionario, soluciones linealizadas no estacionarias y soluciones de aproximación casi linealizada, pero la aplicación de estos modelos está limitada en la simulación del movimiento del agua bajo sistemas de riego por goteo con condiciones limite simples (Subbaiah & Mashru, 2013).

Los modelos numéricos resuelven el flujo gobernante de las ecuaciones de Richards para condiciones iniciales y de contorno particulares, utilizando la técnica de la diferencia finita o la técnica del elemento finito. Estos modelos muestran buenos resultados al compararlos con los resultados de laboratorio para infiltración bajo una fuente puntual de riego. Sin embargo, se necesita un poder computacional intensivo, una extensa información de las propiedades del suelo, involucrando una parametrización con una fina discretización espacial y temporal que podría resultar en errores, siendo demasiado complicado para el uso rutinario (Dasberg & Or, 1999; Subbaiah & Mashru, 2013). Incluso con la disponibilidad actual de computadoras y herramientas para simular la infiltración de una fuente puntual de goteo, los modelos numéricos son poco utilizados por los diseñadores y técnicos de riego (Zazueta et al., 1995).

De acuerdo con Cristóbal-Muñoz et al. (2022) los modelos matemáticos más complejos son aquellos basados en la ecuación de Richards, resultado de la aplicación del principio de conservación de la masa en un volumen de suelo parcialmente saturado. Mientras que los modelos empíricos se benefician de su simplicidad, al tener parámetros más comprensibles para los técnicos del riego y que suelen ser fáciles de obtener, por lo que, son más convenientes para ser utilizados en aplicaciones de campo (Amin & Ekhmaj, 2006; Moncef & Khemaies, 2016).

2.3 Modelos empíricos en la estimación de la geometría del bulbo de mojado

Dado que los modelos analíticos y numéricos en muchos casos requieren un poder de cómputo considerable y un mayor nivel de habilidad en su uso, es casi imposible utilizarlos para fines operativos y de diseño. Por lo tanto, es esencial usar enfoques apropiados para determinar las dimensiones del bulbo de mojado con la precisión adecuada y menos costos computacionales en un período de tiempo más corto, para una amplia gama de factores influyentes. (Karimi et al., 2020). Por lo tanto, los modelos empíricos pueden ser una alternativa ideal para su aplicación en el diseño de sistemas de riego por goteo, debido a su simplicidad (Al-Ogaidi et al. 2016).

Los modelos empíricos pueden derivarse de varios métodos, como el análisis dimensional, regresiones y otros métodos recientes, como las técnicas de Redes Neuronales Artificiales (ANN) a partir de datos experimentales en campo y/o

laboratorio (Karimi et al., 2020). Estos modelos estiman las dimensiones de los patrones de mojado basado en las características hidráulicas del suelo y los parámetros del sistema (Subbaiah, 2013; Kilic, 2020).

Los modelos empíricos se han utilizado por muchos investigadores debido a su aplicación fácil de usar y su precisión aceptable. Prueba de esto son los trabajos realizados por Schwartzman & Zur (1986), Amin & Ekhmaj (2006), Malek & Peters (2011), Al-Ogaidi et al. (2015), Cruz-Bautista et al. (2016) y Cristóbal-Muñoz et al. (2022) en la predicción de las dimensiones de mojado a partir de modelos matemáticos empíricos. También los trabajos realizados por Ekhmaj et al. (2007), Lazarovitch et al. (2009), Hinnell et al. (2010), Elnesr & Alazba (2017) y Karimi et al. (2020) en la simulación de las dimensiones del frente de humedecimiento en riego por goteo a partir de Redes Neuronales Artificiales.

2.4 Medición de la geometría del bulbo de mojado

La medición de la geometría del bulbo de mojado en experimentos de campo o laboratorio es importante, ya que con esta información se pueden generar y evaluar los modelos matemáticos. Por lo tanto, se debe procurar tener información precisa y confiable. En la actualidad existen diferentes métodos o formas para medir la geometría del bulbo de mojado en riego por goteo, que son las siguientes:

Cruz-Bautista et al. (2016) midieron la geometría del bulbo de mojado en campo con diferentes condiciones experimentales a partir del método manual. De igual manera Cristóbal-Muñoz et al. (2022) utilizaron el método manual para obtener la geometría del bulbo de mojado en distintas condiciones experimentales, la diferencia radicó en que realizaron las mediciones en laboratorio y utilizaron un modelo físico de paredes transparentes para dibujar la geometría del bulbo de mojado en distintos tiempos de riego. Kilik (2020) midió la geometría del bulbo de mojado en laboratorio con un modelo físico de paredes transparentes y con el procesamiento de imágenes tomadas por una cámara. Vanella et al. (2021) midieron la geometría del bulbo de mojado y los patrones de humedecimiento del agua en el suelo a partir de imágenes de resistividad eléctrica, tomadas con un sistema de 72 electrodos colocados estratégicamente en dos pequeñas superficies.

Júnior et al. (2016) midieron la geometría del bulbo de mojado a partir de tres métodos, uno de los métodos fue a partir del procesamiento de fotografías donde la identificación del bulbo húmedo se realizaba con un tinte azul en la solución del agua de riego, otro de los métodos fue el uso de sensores de humedad del suelo y el último de los métodos fue un modelo matemático simple. Llegaron a la conclusión que el método de procesamiento de fotografías es muy laborioso y que el método con sensores de humedad del suelo es demasiado costoso.

2.5 Literatura citada

- Al-Ogaidi, A. A., Wayayok, A., Kamal, M. R., & Abdullah, A. F. (2015). A modified empirical model for estimating the wetted zone dimensions under drip irrigation. *Jurnal Teknologi*, 76(15). DOI: 10.11113/jt.v76.5954
- Al-Ogaidi, A. A., Wayayok, A., Rowshon, M. K., & Abdullah, A. F. (2016). Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model. *Agricultural Water Management*, 176, 203-213. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.06.002
- Amin, M. S., & Ekhmaj, A. I. (2006). DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. In 7th International micro irrigation congress (Vol. 1016).
- Bresler, E. (1977). Trickle-drip irrigation: Principles and application to soil-water management. *Advances in Agronomy*, *29*, 343-393. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60222-9
- Bresler, E., Heller, J., Diner, N., Ben-Asher, I., Brandt, A., & Goldberg, D. (1971). Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions. *Soil Science Society of America Journal*, *35*(5), 683-689. DOI: 10.2136/sssaj1971.03615995003500050019x
- Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Martínez-Ruiz, A., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., & Cristóbal-Muñoz, D. (2022). An

Improved Empirical Model for Estimating the Geometry of the Soil Wetting Front with Surface Drip Irrigation. *Water*, 14(11), 1827. DOI: 10.3390/w14111827

- Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., & Siller-González, M. (2016). Validación de un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo con riego por goteo. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(1), 45-55.
- Dasberg, S., Or, D. (1999). Practical Applications of Drip Irrigation. In: Drip Irrigation. Applied Agriculture. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Ekhmaj, A. I., Abdulaziz, A. M., & Almdny, A. M. (2007). Artificial neural networks approach to estimate wetting pattern under point source trickle irrigation. In *African Crop Science Conference* (Vol. 8, pp. 1625-1630).
- Elnesr, M. N., & Alazba, A. A. (2017). Simulation of water distribution under surface dripper using artificial neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 90-99. DOI: 10.1016/j.compag.2017.10.003
- Hillel, D. (1988). Status of research in drip/trickle irrigation. In *Paper presented at* the Symposium on Irrigation of Sugarcane and Associated Crops. April 18-22. Reduit, Mauritius, 1988.
- Hinnell, A. C., Lazarovitch, N., Furman, A., Poulton, M., & Warrick, A. W. (2010). Neuro-Drip: estimation of subsurface wetting patterns for drip irrigation using neural networks. *Irrigation science*, 28(6), 535-544. DOI: 10.1007/s00271-010-0214-8
- Júnior, J. A., Bandaranayake, W. M., & Syvertsen, J. (2016). Drip irrigation wetting patterns in a mid Florida sandy soil. *IRRIGA*, 1(01), 1-1. DOI: 10.15809/irriga.2016v1n01p1-25
- Kandelous, M. M., & Šimůnek, J. (2010). Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, 28(5), 435-444. DOI: 10.1007/s00271-009-0205-9
- Karimi, B., Mohammadi, P., Sanikhani, H., Salih, S. Q., & Yaseen, Z. M. (2020).
 Modeling wetted areas of moisture bulb for drip irrigation systems: An enhanced empirical model and artificial neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105767. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105767
- Kilic, M. (2020). A new analytical method for estimating the 3D volumetric wetting pattern under drip irrigation system. *Agricultural Water Management*, 228, 105898. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105898
- Lazarovitch, N., Poulton, M., Furman, A., & Warrick, A. W. (2009). Water distribution under trickle irrigation predicted using artificial neural networks. *Journal of Engineering Mathematics*, 64(2), 207-218. DOI: 10.1007/s10665-009-9282-2

- Lubana, P. P. S., & Narda, N. K. (2001). SW—Soil and Water: Modelling Soil Water Dynamics under Trickle Emitters—a Review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *78*(3), 217-232. DOI: 10.1006/jaer.2000.0650
- Malek, K., & Peters, R. T. (2011). Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(8), 530-536. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000320
- Moncef, H., & Khemaies, Z. (2016). An analytical approach to predict the moistened bulb volume beneath a surface point source. *Agricultural Water Management*, 166, 123-129. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.12.020
- Naglič, B., Kechavarzi, C., Coulon, F., & Pintar, M. (2014). Numerical investigation of the influence of texture, surface drip emitter discharge rate and initial soil moisture condition on wetting pattern size. *Irrigation science*, 32(6), 421-436. DOI: 10.1007/s00271-014-0439-z
- Ravi, V., Williams, J. R., & Burden, D. S. (1998) Estimation of infiltration rate in the vadose zone: compilation of simple mathematical models, Report EPA/600/R-97/128a, National Risk Management Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, Ada OK 74820
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318-333. DOI: 10.1063/1.1745010
- Schwartzman, M., & Zur, B. (1986). Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(3), 242-253. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:3(242)
- Shiri, J., Karimi, B., Karimi, N., Kazemi, M. H., & Karimi, S. (2020). Simulating wetting front dimensions of drip irrigation systems: Multi criteria assessment of soft computing models. *Journal of Hydrology*, *585*, 124792.
- Subbaiah, R. (2013). A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*, 31(3), 225-258.
- Subbauah, R., & Mashru, H. H. (2013). Modeling for predicting soil wetting radius under point source surface trickle irrigation. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *15*(3), 1-10.
- Thorburn, P. J., Cook, F. J., & Bristow, K. L. (2003). Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. *Irrigation Science*, 22(3), 121-127. DOI: 10.1007/s00271-003-0077-3
- Vanella, D., Ramírez-Cuesta, J. M., Sacco, A., Longo-Minnolo, G., Cirelli, G. L., & Consoli, S. (2021). Electrical resistivity imaging for monitoring soil water motion patterns under different drip irrigation scenarios. *Irrigation Science*, 39(1), 145-157. DOI: 10.1007/s00271-020-00699-8
- Zazueta, F. S., Clark, G. A., Smajstrla, A. G., & Carrillo, M. (1995). A simple equation to estimate soil-water movement from a drip irrigation source. Conserving resource/Preserving the environment. In *Proceedings of the Fifth International Microirrigation Congress, ASAE* (pp. 581-856).

3 MEDICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO CON VISIÓN ARTIFICIAL

El presente capítulo de Tesis fue publicado (versión resumida) en octubre del 2021 en las MEMORIAS DEL IX CONGRESO INTERNACIONAL Y XXIII CONGRESO NACIONAL DE CIENCIAS AGRONÓMICAS (PP. 567-568). CHAPINGO, MÉXICO.

A partir de esta publicación previa y de trabajos posteriores se inventó un "DISPOSITIVO Y MÉTODO PARA MEDIR CON VISIÓN ARTIFICIAL LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO". La solicitud de registro de Patente ante el INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL (IMPI), se realizó el 07 de octubre de 2022 con el expediente: MX/a/2022/012646. En las Figuras 1-88 de la sección de Anexos se pueden observar algunas hojas de la solicitud de registro de Patente a manera de probatorios.

Se agradece a la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo, en específico a la Oficina de Patentes y Variedades por el apoyo técnico-administrativo para gestionar y realizar los trámites correspondientes para el registro de Patente.

Para el tercer capítulo de Tesis se tomó la estructura y formato solicitado por el "Manual para la Elaboración del Documento de Graduación", publicado en mayo de 2016 por la Coordinación General de Estudios de Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo.

3 MEDICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO CON VISIÓN ARTIFICIAL

Irouri Cristóbal Muñoz¹; Jorge Víctor Prado Hernández^{*2}; Noé Velázquez López³; David Cristóbal Acevedo².

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Código postal. 56230. México.

²Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo.

³Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo.

*Autor de correspondencia: vpradohdez@gmail.com

3.1 Resumen

A partir del conocimiento de la geometría del bulbo húmedo del agua en el suelo, se pueden obtener grandes beneficios en la producción de alimentos y en el ahorro de recursos, para ello es necesario obtener información confiable de una manera rápida eficiente y fácil, ya que los métodos de medición actuales tienen ciertas limitantes y no permiten la medición de alta frecuencia de la evolución espacio-temporal de la geometría del bulbo húmedo. El objetivo de la presente investigación fue desarrollar un sistema de visión artificial capaz de medir la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, solventando las limitaciones de otros métodos de medición. Para ello se utilizaron dos metodologías, una acerca del uso de visión artificial en una aplicación agrícola y otra acerca de la medición de la geometría del bulbo húmedo en un modelo físico de paredes transparentes. A partir de ambas metodologías se propuso un sistema de visión artificial, donde su capacidad de medición fue evaluada a partir de mediciones experimentales y de la raíz del error cuadrático medio (RMSE). El RMSE entre las mediciones manuales y las medidas con el sistema de visión artificial propuesto fue de 0.036 centímetros para la dimensión horizontal y 0.066

Tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Irouri Cristóbal Muñoz

Director de Tesis: Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

centímetros para la dimensión vertical, siendo excelentes resultados. El sistema de visión artificial propuesto es capaz de medir la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo de una manera automática, eficiente, fácil y rápida, solventando las limitaciones de otros métodos de medición. Dando la posibilidad de utilizar el dispositivo y método de medición en la automatización de procesos productivos agrícolas a gran escala y en la toma de decisiones en tiempo real.

Palabras clave: Visión por computadora, frente de humedecimiento, modelación del riego, instrumentación y metrología.

Abstract

From the knowledge of the geometry of the wet bulb of the water in the soil, great benefits can be obtained in the production of food and in the saving of resources, for this it is necessary to obtain reliable information in a fast, efficient and easy way, since Current measurement methods have certain limitations and do not allow high-frequency measurement of the spatio-temporal evolution of the wet bulb geometry. The objective of this research was to develop an artificial vision system capable of measuring the geometry of the wet bulb in drip irrigation, overcoming the limitations of other measurement methods. For this, two methodologies were used, one about the use of artificial vision in an agricultural application and another about the measurement of the geometry of the wet bulb in a physical model of transparent walls. Based on both methodologies, an artificial vision system was proposed, where its measurement capacity was evaluated based on experimental measurements and the root mean square error (RMSE). The RMSE between the manual measurements and the measurements with the proposed artificial vision system was 0.036 centimeters for the horizontal dimension and 0.066 centimeters for the vertical dimension, with excellent results. The proposed artificial vision system is capable of measuring the geometry of the wet bulb in drip irrigation in an automatic, efficient, easy and fast way, overcoming the limitations of other measurement methods. Giving the possibility of using the device and measurement method in the automation of large-scale agricultural production processes and in real-time decision-making.

Keywords: Computer vision, wetting front, irrigation modeling, instrumentation and metrology.
3.2 Introducción

En el diseño de sistemas de riego por goteo es importante la selección de una combinación óptima de tasa de descarga de emisores y espaciamiento entre emisores para un conjunto dado de suelo, cultivo y condiciones climáticas, así como la comprensión del patrón de humedecimiento alrededor del emisor (Lazarovitch et al., 2009). Con el conocimiento de la geometría del bulbo húmedo del agua en el suelo, el emisor o emisores pueden ubicarse adecuadamente para que la planta pueda consumir agua y nutrientes de manera eficiente, con menores costos por labores culturales y mayores ingresos por el aumento del rendimiento (Skaggs et al., 2010).

En la actualidad existen diferentes métodos o formas para medir la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, ya sea de manera manual (Cruz-Bautista et al., 2016), con fotografías y softwares de procesamiento de imagen (Kilik, 2020) o de estimaciones a partir de mediciones de sensores de humedad del suelo o de electrodos de resistividad eléctrica (Júnior et al., 2016; Vanella et al., 2021). Pero la medición de alta frecuencia de la evolución espacio-temporal de la geometría del bulbo húmedo con estos métodos no es una opción, además de existir otras limitantes particulares dependiendo del método que se utilice.

De igual manera con los métodos de medición actuales no existe la posibilidad del uso de la información de la geometría del bulbo húmedo en la automatización de procesos productivos agrícolas a gran escala y en la toma de decisiones en tiempo real. Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue desarrollar un sistema de visión artificial capaz de medir la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo de una manera automática, eficiente, fácil y rápida, solventando las limitaciones de otros métodos de medición.

3.3 Materiales y Métodos

Se tomó de referencia la metodología utilizada por Cristóbal-Muñoz (2019) en la obtención del patrón de humedecimiento en riego por goteo en un modelo físico de paredes transparentes (medición manual), a esta metodología se le adaptó la metodología utilizada por Velázquez-López et al. (2011) en la detección de cenicilla en rosa usando procesamiento de imágenes por computadora, ya que hay poca información disponible del uso de visión artificial en aplicaciones de riego, en el caso de la medición de la geometría del bulbo húmedo con visión artificial la información disponible es nula.

A partir de ambas metodologías se propuso el sistema experimental que se muestra en la Figura 1. Se construyó un sistema experimental a escala en el que se utilizó una computadora ASUS con un procesador CORE i7, una cámara web VIVITAR VWC104 con una resolución de 720p, un foco RGB wifi, un foco de luz blanca de 45 W, un Softbox, un tripié de cámara réflex y un modelo a escala del contenedor de suelo constituido por un recipiente de prolipropileno, lleno de suelo agrícola de textura franco arenosa con un emisor situado en la superficie del suelo.



Figura 1. Sistema experimental propuesto.

La cámara fotográfica se colocó a una altura de 70 cm y una separación de 30 cm del objetivo. La implementación del algoritmo para obtener la evolución del bulbo de mojado se hizo en Microsoft Visual Studio (Community) y las librerías de OpenCV 4.4. OpenCV es una librería de código abierto de visión por computadora, la cual es una librería de alto nivel que implementa algoritmos para técnicas de calibración, detección de características y rastreo, forma, análisis de movimiento, reconstrucción 3D, reconocimiento y segmentación de objetos. La librería corre bajo Linux, Windows y Mac OSX (Velázquez-López et al., 2011).

Dicho algoritmo consta de tres etapas secuenciales: 1) automatización de la captura y guardado de imágenes en un intervalo de tiempo elegido, 2) rectificación de las imágenes guardadas con los parámetros de calibración obtenidos, y 3) identificación de la geometría del bulbo húmedo, a partir del espacio de color HSV y de una máscara binaria de la imagen en la que el color blanco se asocia con presencia del bulbo húmedo y con negro su ausencia (Figura 2).



Figura 2. Identificación del bulbo húmedo.

En la etapa tres del algoritmo se realiza un escaneo de la imagen binaria para encontrar la ubicación del emisor y los puntos más lejanos del frente de mojado respecto del emisor (Figura 3). En este trabajo se comparó la evolución temporal de los valores observados y estimados de solamente las distancias verticales y horizontales del frente de mojado respecto al emisor.



Figura 3. Medición de las dimensiones de mojado.

La evaluación de las capacidades del sistema de visión artificial propuesto se hizo con la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) (Willmott et al., 2012).

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)^2\right]^{1/2}$$
(1)

3.4 Resultados y Discusión

El RMSE entre las mediciones manuales y las mediciones del sistema de visión artificial propuesto fue de 0.036 centímetros para la dimensión horizontal y 0.066 centímetros para la dimensión vertical, resultados considerados como excelentes. El umbral óptimo encontrado para este trabajo en el espacio de color HSV fue H de 0-255, S de 0-56 y V de 44-57.

3.5 Conclusiones

Se desarrolló un sistema de visión artificial capaz de medir la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo de una manera automática, eficiente, fácil y rápida, solventando las limitaciones de otros métodos de medición. Dando la posibilidad de utilizar el dispositivo y método de medición en la automatización de procesos productivos agrícolas a gran escala y en la toma de decisiones en tiempo real.

Agradecimientos

Se le agradece a la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por el apoyo otorgado para la adquisición de materiales necesarios en la investigación. El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca recibida.

3.6 Literatura citada

- Cristóbal-Muñoz, I. (2019). Medición y análisis del patrón de humedecimiento en riego por goteo superficial en un suelo franco arcillo arenoso. Tesis de licenciatura, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, México: 45-63.
- Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., & Siller-González, M. (2016). Validación de un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo con riego por goteo. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(1), 45-55.
- Júnior, J. A., Bandaranayake, W. M., and Syvertsen, J. (2016). Drip irrigation wetting patterns in a mid Florida sandy soil. *IRRIGA*, 1(01), 1-1. DOI: 10.15809/irriga.2016v1n01p1-25
- Kilic, M. (2020). A new analytical method for estimating the 3D volumetric wetting pattern under drip irrigation system. *Agricultural Water Management*, 228, 105898. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105898
- Lazarovitch, N., Poulton, M., Furman, A., & Warrick, A. W. (2009). Water distribution under trickle irrigation predicted using artificial neural networks.

Journal of Engineering Mathematics, 64(2), 207-218. DOI: 10.1007/s10665-009-9282-2

- Skaggs, T. H., Trout, T. J., Šimůnek, J., & Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(4), 304-310. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(304)
- Vanella, D., Ramírez-Cuesta, J. M., Sacco, A., Longo-Minnolo, G., Cirelli, G. L., & Consoli, S. (2021). Electrical resistivity imaging for monitoring soil water motion patterns under different drip irrigation scenarios. *Irrigation Science*, 39(1), 145-157. DOI: 10.1007/s00271-020-00699-8
- Velázquez-López, N., Sasaki, Y., Nakano, K., Mejía-Muñoz, J. M., & Romanchik Kriuchkova, E. (2011). Detección de cenicilla en rosa usando procesamiento de imágenes por computadora. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 17(2), 151-160.
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. International *Journal of Climatology*, 32(13), 2088–2094. DOI: 10.1002/joc.2419

4 OPTIMIZACIÓN DE LA REPRESENTACIÓN DEL AVANCE DE HUMEDECIMIENTO EN RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL A PARTIR DEL NÚMERO DE SENSORES Y SU SEPARACIÓN

El presente capítulo de Tesis fue publicado en agosto del 2022 en las MEMORIAS DEL 65° CONGRESO INTERNACIONAL DE ACODAL: AGUA, SANEAMIENTO, AMBIENTE Y ENERGÍAS RENOVABLES. BOGOTÁ, COLOMBIA.

Para el cuarto capítulo de Tesis se tomó la estructura y formato solicitado por el comité editorial del Congreso, La información del Cuarto capítulo se citará dando prioridad a la publicación previa.

APA

Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Ruiz-García, A., & Cristóbal-Acevedo, D. (2022). Optimización de la representación del avance de humedecimiento en riego por goteo superficial a partir del número de sensores y su separación. N. Castaño-Contreras, & M. Feuillet-Guerrero (copiladores). 65° *CONGRESO INTERNACIONAL DE ACODAL: AGUA, SANEAMIENTO, AMBIENTE Y ENERGÍAS RENOVABLES* (pp. 90-101). Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – ACODAL. ISSN: 2539-0309 (En línea).

Optimización de la representación del avance de humedecimiento en riego por goteo superficial a partir del número de sensores y su separación

I. Cristóbal Muñoz¹, J.V. Prado Hernández^{2*}, A. Ruiz García³, D. Cristóbal Acevedo²

¹Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. ²Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo.

³Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo.

*Autor corresponsal: Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco KM 38.5, Chapingo, Texcoco, México. 56230. México. Email: <u>vpradohdez@gmail.com</u>

Abstract

At present, at a global level, agriculture is required to produce more food, but with less water, where drip irrigation can be an excellent option to face this challenge. Reliable and accurate information on wetting patterns is necessary to obtain the maximum benefit from drip irrigation. The use of soil moisture sensors has played an important role in the development of research on this topic. The main limitation of the use of sensors in experiments is that the number of sensors used and their separation between them is determined empirically. For this reason, the objective of this research was to optimize the representation of the vertical advance of wetting in surface drip irrigation, based on the number of soil moisture sensors and their separation. For this, the HYDRUS-1D software was calibrated with experimental data, then graphical representations of the vertical wetting advance were created with SURFER 10 in different scenarios, with the above information a mathematical model was generated as an objective function to be optimized, in which it was obtained the root mean square error (RMSE) of the plot from the number of sensors and their separation. It was possible to optimize the representation of the vertical wetting advance, obtaining with 5 sensors and 10 cm of separation an optimal value of the RMSE of 1.72 cm.

KeyWords: Irrigation optimization, nonlinear programming, soil water movement modeling, wetted bulb, wetting front.

OPTIMIZACIÓN DE LA REPRESENTACIÓN DEL AVANCE DE HUMEDECIMIENTO EN RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL A PARTIR DEL NÚMERO DE SENSORES Y SU SEPARACIÓN

Resumen

En la actualidad a nivel mundial se le exige a la agricultura una mayor producción de alimentos, pero con una menor cantidad de agua, donde el riego por goteo puede ser una excelente opción para enfrentar este desafío. Para obtener el máximo beneficio del riego por goteo es necesaria información confiable y precisa de los patrones de humedecimiento. El uso de sensores de humedad del suelo ha jugado un papel importante en el desarrollo de las investigaciones de esta temática. La principal limitación del uso de sensores en experimentos es que el número de sensores utilizado y su separación entre ellos se determina de manera empírica. Por este motivo el objetivo de la presente investigación fue optimizar la representación del avance vertical de humedecimiento en riego por goteo superficial, a partir del número de sensores de humedad del suelo y su separación. Para ello se calibró el software HYDRUS-1D con datos experimentales, después se crearon representaciones gráficas del avance vertical de humedecimiento con SURFER 10 en distintos escenarios, con la información anterior se generó un modelo matemático como función objetivo a optimizar, en el cual se obtuvo la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de la representación gráfica a partir del número de sensores y su separación. Se logró optimizar la representación del avance vertical de humedecimiento obteniendo con 5 sensores y 10 cm de separación un valor óptimo del RMSE de 1.72 cm.

Palabras clave: Bulbo húmedo, frente de humedecimiento, modelación del movimiento del agua en el suelo, optimización del riego, programación no lineal.

Introducción

El alto consumo de agua disponible por la agricultura, la baja eficiencia en su uso a nivel mundial, y la fuerte competencia por dicho recurso por los diferentes sectores, demandan a la agricultura una optimización de la producción de alimentos, utilizando menos agua, sin degradar el suelo y los recursos hídricos (Skaggs *et al.*, 2004). La tecnología de riego por goteo puede ayudar a enfrentar este desafío, debido a su alta eficiencia de aplicación, otorgando a los productores un mayor control sobre la aplicación de agua, fertilizantes y pesticidas, además de reducir los costos por bombeo (Júnior *et al.*, 2016). Para lograr el potencial que ofrece la tecnología del riego por goteo, es necesario optimizar aspectos de diseño y operación, tales como: espaciamiento de instalación de los emisores, caudales de los emisores, frecuencia y tiempo del riego (Skaggs et al., 2004).

En el diseño de sistemas de riego por goteo para cultivos en hileras, las dimensiones del volumen de mojado y la distribución de humedad dentro de este volumen, son dos de los factores principales para determinar el espaciamiento de los goteros para obtener una distribución óptima del agua en la zona radicular del cultivo (Kandelous y Šimůnek, 2010b). Por este motivo, diversos investigadores han realizado trabajos en campo y laboratorio para obtener información acerca de los patrones de humedecimiento en riego por goteo (Subbaiah, 2013).

La distribución de humedad del volumen de mojado se puede obtener por tres medios: a través de mediciones en experimentos en campo, con mediciones en modelos físico experimentales en laboratorio, y con el uso de modelos matemáticos (Cruz-Bautista *et al.*, 2016). Existe una problemática al realizar los experimentos de riego en campo, debido a varios factores externos y complicaciones al tomar las mediciones, alterando los posibles resultados (Cristóbal-Muñoz *et al.*, 2022), debido a esto y al avance de tecnologías de medición de humedad del suelo, diversos autores realizaron experimentos de riego por goteo en ambientes controlados, ellos obtuvieron resultados satisfactorios a partir de modelos físicos de paredes transparentes, donde se pudieron observar los patrones de humedecimiento de una fuente puntual de riego en tiempo real y sin alterar físicamente el suelo durante las mediciones (Kandelous y Šimůnek, 2010a; Nafchi *et al.*, 2011; Al-Ogaidi *et al.*, 2016; Iqbal *et al.*, 2017).

Cada día es más común el uso de sensores de humedad del suelo en experimentos de campo o laboratorio (Al-Ghobari, 2012; Júnior *et al.*, 2016), donde a partir de la información experimental o de la calibración de modelos matemáticos numéricos con datos experimentales, se pueden obtener representaciones graficas del avance de humedecimiento en distintas condiciones iniciales y de riego (Figura 1).



Figura 1: Representación gráfica de la distribución del contenido de humedad del suelo en riego por goteo subsuperficial (Fuente: Kandelous *et al.*, 2011).

La medición de la distribución de humedad en riego por goteo con el uso de sensores de humedad del suelo es una buena alternativa, siempre que estos sean precisos y permitan medir con alta frecuencia la evolución espacio-temporal de la humedad en el suelo, pero es necesario contemplar un especial cuidado en su instalación y uso, además del costo de su adquisición (Cristóbal-Muñoz *et al.*, 2021). La principal limitación del uso de sensores en experimentos de campo o laboratorio es que el número de sensores utilizado y su separación entre ellos se determina de manera empírica, restringiendo la calidad de los resultados obtenidos por un mal posicionamiento de los sensores.

Por este motivo el presente trabajo buscó utilizar las bondades de la programación lineal y no lineal, para optimizar la representación del avance de humedecimiento en riego por goteo superficial a partir del número de sensores de humedad del suelo y su separación, encontrando la posición y el número óptimo de sensores a utilizar, minimizando el error de la representación gráfica del avance vertical de humedecimiento.

Material y metodología

La metodología experimental se definió a partir de las experiencias obtenidas por Ditkowski *et al.* (2000), Deep y Das (2008) y Soulis y Elmaloglou (2018) en la optimización de la infiltración de sustancias a través de un medio poroso, y de las experiencias de Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006), Malek y Peters (2011), Al-Ogaidi *et al.* (2015), y Cruz-Bautista *et al.* (2016) en la generación de modelos matemáticos del avance de humedecimiento a partir de regresiones con múltiples variables.

La metodología constó de tres partes principales; la primera fue la calibración del software HYDRUS-1D (Kandelous y Šimůnek, 2010a) con datos experimentales para obtener una mejor representación del avance vertical de humedecimiento (Figura 2), la segunda parte fue crear representaciones graficas del avance vertical de humedecimiento con el Software SURFER 10 (Golden Software, Inc. ®) y la información de HYDRUS-1D (Figura 3), donde se contemplaron distintos escenarios físicos (variaciones del número de sensores utilizados y separación entre sensores), la tercera parte fue generar un modelo matemático como función objetivo a optimizar, en el cual se obtenga la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de la representación gráfica a partir del número de sensores y su separación.





Figura 2: Calibración HYDRUS-1D.

Surfer - [10S 10cm proyec	t.srf]													-	o ×
🚽 File Edit View Drav	v Arrange Grid Map	Window Help													_ 8 ×
🗋 🗅 🚅 🖬 🛄 🎒 🐰 🗉	🖻 🛍 🗠 🗠 📲 🕅	`{^??®.€.	ର୍ଷ୍ଠ	🔶 Т 📣	\/ ₩ 🗆										
A Text	20-442444444444444444444444444444444444	անքիսիսիսինիսիսի	սե <mark>ն</mark> սեսեւ	նեսեսեսենես	եռեռեներեր	սեներին հեր	եսեսենեւ	սիսիշիսիսիսի		երինիներին	9 	dalan 11	12 13		15 ~ 53
Color Scale	huhut	TIME 0.5	TIME 1	TIME 1.5	TIME 2	TIME 2.5	TIME 3	TIME 3.5	TIME 4	TIME 4.5	TIME 5	TIME 5.5	TIME 6	TIME 6.5	191 191
Right Axis			***	***	***	***			<u> </u>						E
Image: Press of the second	57.5	100-	100-	100-	100-	100-	100-	100-	100-	100-	100-	100-	100-	100-	69
Iop Axis	18	90- <mark></mark> -	90	50	90-	20-		90-							*
Bottom Axi	47.5								~	~	90-	50-	90-	90-	t.e
A Text	42.5	- 08	80-	80-	80-00-	80-08	80-	80-	80-	80-	80-	80-	80-	80-	0-0
Color Scale	17	70	70	70-	70-	70-	70	70				_			080
Han Man	32.5								~ _	70-	70-	70-	70-	70-	<u></u>
Right Axis	25	60-	60-	60-	60-	eo-	60-	60-	60-	60-	60-	60-	60-	eo-	
	16-1		-												
- I Top Axis	15			~			50-	50-	50-	50-	50-	50-	50-	so-	
Bottom Axi:	15	40-	40-	40-	40-	40-	40-	40-	40-	40-	40-	40-	40		
Contours															
⊡A Text		~-	30-	20-	30-	30-	30-	30-	30-	30-	30-	30-	30-	30-	
Color Scale	143	20-	20-	20-	20	20-	20-	20-	20-	20	~				
🖻 🗹 🛄 Map											10		20-	20-	
	13	10-	10-	10-	10-	10-	10-	10-	10-	10-	10-	10-	10-	10-	
Eft Axis	13	•	•	•											
MHH TOP AXIS	13	-2 2	-2 2	2 2	-2 2	-2 2	-2 2	-2 2	-2 2	3.7	-2 2	4 1	- <u>-</u>	° 1 2	
Bottom Axi:	13		50	60 57 S	50	60 57.5	60	60	60	60	60 57.5	60	50	60 57.5	
A Text	114		55 52.5	55	55	55	57.5	57.5	57.5	57.5	55 52.5	57.5	55 52.5	55 52.5	
Color Scale	13		50	50 47.5	50	47.5	50	50	52.5	50	50 47.5	52.5	50 47.5	50 47.5	
H Map	113		45	45	45	42.5	45	45	45	45	42.5	45	45	45	
Right Axis	H		40 37.5	40 37.5	40	97.6 35	40	40	40	40	40 37.5	40	40 37.5	40 37.5	
- I Left Axis	13		35	30 32.5	35	32.5	35	35 32.5	35	35	32.5	35	30 32.5	32.5	
	10		27.5	27.6	27.5	27.5	30 27.5	30 27.5	30 27.5	30 27.5	27.5	30 27.5	27.5	27.5	
Bottom Axi:	[]		22.5	22.5	22.5	22.5	25	22.5	25 22.5	25	22.5	25	22.5	22.5	
		,	e	17.5	1	17.5		= ~	20	20	17.5	20	17.5	17.5	

Figura 3: Representaciones gráficas de un solo escenario físico.

En la primera parte de la metodología la calibración de HYDRUS-1D fue a partir de la información de un primer riego por goteo superficial en un suelo de textura franco arenosa (52.2% de arena, 28.8% de limo y 19% de arcilla), con un caudal del emisor de 2.92 litros, una densidad aparente de 1.4 g cm⁻³ y una duración de riego de 6.5 horas, en un modelo físico de paredes transparentes igual al utilizado por Cristóbal Muñoz *et al.* (2022). En la Figura 4 se observa el posicionamiento de los sensores de humedad del suelo dentro del modelo físico de paredes transparentes, donde solo se contempló para la calibración de HYDRUS-1D la información de los cuatro sensores que se encuentran por debajo del emisor. Los sensores de humedad del suelo del suelo que se utilizaron fueron los sensores modelo S-SMC-M005 (Onset HOBO ®) cuyo error es de 3%.



Figura 4: Posicionamiento de los sensores de humedad del suelo dentro del modelo físico de paredes transparentes.

Para el caso de la segunda parte de la metodología se definió el espacio de estudio para las representaciones gráficas del avance vertical de humedecimiento, se simuló con HYDRUS-1D calibrado el proceso de infiltración en un perfil de suelo de 105 cm de profundidad, con distintos escenarios físicos donde se variaba el arreglo de los sensores, la variable X es la distancia entre sensores y la variable Y es el número de sensores utilizados (Figura 5). El primer sensor se colocó siempre a 5 cm de profundidad de la superficie del suelo ya que es el límite mínimo permisible recomendado por el fabricante de los sensores para colocar un sensor cerca de la superficie del suelo. El límite mínimo permisible de separación entre sensores recomendado por el fabricante es de 10 cm debido que a separaciones menores se generan mediciones erróneas por interferencia entre sensores, por este motivo X varió de 10 a 30 cm con incrementos de 5 cm y Y varió de 3 a 10 sensores con un incremento de un sensor, dando un total de 20 escenarios físicos posibles donde las restricciones fueron el espacio disponible de estudio y las limitantes físicas de los instrumentos de medición utilizados.



Figura 5: Espacio de estudio y posicionamiento de los sensores en las simulaciones de riego.

Después se utilizó SURFER-10 para generar las representaciones gráficas del avance de humedecimiento en cada escenario físico simulado en HYDRUS-1D, utilizando el método de Kriging para realizar interpolaciones entre las mediciones de los sensores simulados, las representaciones gráficas fueron generadas tomando la información simulada en intervalos de 30 minutos de las 6.5 horas del riego, dando un total de 13 representaciones gráficas por escenario físico como se observa en la Figura 3. A partir de las mediciones observadas del avance vertical de humedecimiento en la prueba experimental y las mediciones de avance estimadas por las representaciones gráficas se calculó el RMSE para cada escenario físico (Ecuación 1).

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)^2\right]^{1/2}$$

Donde

N: Número total de datos. Pi: I-ésimo dato estimado. Oi: I-ésimo dato observado. Ecuación (1)

En la tercera parte de la metodología se definió la función objetivo a optimizar en el cual se generó un modelo matemático para la determinación del RMSE de la representación gráfica a partir de la separación entre sensores (X) y el número de sensores utilizados (Y). Se probaron distintos modelos matemáticos a partir de regresiones múltiples lineales y no lineales, además de modelos generados por la aplicación CFTOOL (Curve Fitting) del software MATLAB (The MathWorks, Inc. ®). Obteniendo el siguiente problema de optimización.

Sujeto a las siguientes restricciones debidas al espacio disponible de estudio y las limitantes físicas de los instrumentos de medición utilizados.:

$X(Y-1) \le 90$	Ecuación (3)
$10 \le X \le 30$	Ecuación (4)
$3 \le Y \le 10$	Ecuación (5)
Y = Número entero positivo Donde	Ecuación (6)

Y: Número de sensores. X: Distancia entre sensores

Resultados y discusión

En la Ecuación 7 se puede observar el modelo matemático que obtuvo los mejores resultados (CFTOOL-MATLAB) y en la Figura 6 el comportamiento de dicho modelo.

RMSE = 238.2	-26.03X - 111.4Y	⊦ 0.9181 <i>X</i> ^2 ·	+ 10.12XY + 1'	7.83Y^2 – 0.0103	7X^3
	- 0.2777 <i>X</i> ^2 <i>Y</i> - 1	$.152XY^2 - 1$	$1.175Y^3 + 0.0$	$02342X^{3}Y + 0.0$	01668 <i>X</i> ^2 Y^2
	$+ 0.041 XY^{3}$				
	$+ 0.02673Y^{4}$				Ecuación (7)
2 1					• •

Donde

Y: Número de sensores.

X: Distancia entre sensores.



Figura 6: Comportamiento del mejor modelo matemático obtenido.

A partir de la Ecuación 7 se obtuvo un problema de optimización no lineal, el cual se resolvió con las funciones "fmincon" y "SQP" del Software MATLAB, dando como resultados óptimos 10 cm de separación entre sensores (X_{opt}) y 5 sensores utilizados (Y_{opt}), siendo 10 cm el límite mínimo permisible recomendado por el fabricante de los sensores de humedad del suelo, ya que con separaciones menores existe interferencia entre las mediciones de sensores generando mediciones erróneas. Además, con una configuración de 5 sensores a 10 cm de separación se llega a una profundidad de observación de 55 cm cuando las simulaciones del avance vertical de humedecimiento solo llegaron a 35 cm, esto quiere decir que el número óptimo de sensores a utilizar es entre 1 a 2 sensores más por fuera del avance máximo que se requiera estudiar. El valor del RMSE de las representaciones gráficas con la configuración optima (X = 10 cm, Y = 5 sensores) es de 1.72 cm, siendo un excelente resultado en comparación a lo encontrado por Cristóbal-Muñoz *et al.* (2020) en la predicción de la geometría del bulbo de mojado en una textura franco arcillo arenosa, a partir de mediciones de sensores de humedad del suelo y el método de Kriging con el software SURFER 10, con 4 sensores y una separación de 20 cm entre ellos, donde los valores de RMSE oscilaron entre 3.4 a 8.7 cm en la predicción de la profundidad de mojado.

Conclusiones

Se logró optimizar la representación del avance vertical de humedecimiento en riego por goteo superficial a partir del número de sensores de humedad del suelo y su separación. Comprobando que la mejor distancia entre sensores es la mínima permitida por las limitantes físicas de los aparatos utilizados, además el número óptimo de sensores es entre 1 a 2 sensores más por fuera del avance máximo que se requiera estudiar.

Agradecimientos. Se agradece a la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo por el apoyo otorgado para la adquisición del sistema experimental y para la asistencia al congreso. El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca recibida.

Referencias bibliográficas

Amin, M. S. M., and Ekhmaj, A. I. M. (2006). DIPAC-Drip Irrigation Water Distribution Pattern Calculator. 7th International Micro Irrigation Congress, 10-16 Sept., Pwtc, Kuala Lumpur, Malaysia.

- Al-Ghobari, H. M. (2012). A comparison of water application uniformity for drip irrigation system above and below soil surface at various soil depths and scheduling techniques in arid region. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, *168*, 311-322.
- Al-Ogaidi, A. A. M., Wayayok, A., Rowshon, M., & Abdullah, A. (2015). A Modified Empirical Model for Estimating the Wetted Zone Dimensions under Drip Irrigation. J. Teknol, 76, 69–73. DOI: 10.11113/jt.v76.5954

- Al-Ogaidi, A. A. M., Wayayok, A., Rowshon, M., and Abdullah, A. (2016). Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model. *Agricultural Water Management*, 176, 203-213. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.06.002
- Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., and Cristóbal-Acevedo, D. (2020). *Geometría del bulbo de mojado de riego por goteo a partir de sensores de humedad de suelo*. Memoria del VIII Congreso Internacional y XXII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas. Chapingo, México. 417-418.
- Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Salazar-Moreno, R. y Martínez-Ruiz, A. (2021). Aplicación de redes neuronales artificiales en la medición de las dimensiones del bulbo húmedo en riego por goteo superficial. Décimo congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas, Universidad Autónoma Chapingo, 21 y 22 de octubre de 2021. 50 pp.
- Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Martínez-Ruiz, A., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., and Cristóbal-Muñoz, D. (2022). An Improved Empirical Model for Estimating the Geometry of the Soil Wetting Front with Surface Drip Irrigation. *Water*, **14**(11), 1827.
- Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., y Siller-González, M. (2016). Validación de un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo con riego por goteo. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(1), 45-55.
- Deep, K., and Das, K. (2008). Optimization of infiltration parameters in hydrology. *World Journal of Modelling and Simulation*, **4**(2), 120-130.
- Ditkowski, A., Gottlieb, D., and Sheldon, B. (2000). Optimization of chemical vapor infiltration with simultaneous powder formation. *Journal of Materials Research*, **15**(12), 2695-2705. doi:10.1557/JMR.2000.0388
- Iqbal, M., Ghumman, A. R., and Hashmi, N. H. (2017). Study of wetting pattern under drip-emitter using sand box model and empirical equations. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 54(3), 699-709. DOI: 10.21162/PAKJAS/17.6086
- Júnior, J. A., Bandaranayake, W. M., and Syvertsen, J. (2016). Drip irrigation wetting patterns in a mid Florida sandy soil. *IRRIGA*, **1**(01), 1-1. DOI: 10.15809/irriga.2016v1n01p1-25
- Kandelous, M. M., and Šimůnek, J. (2010a). Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, 28, 435-444. DOI: 10.1007/s00271-009-0205-9
- Kandelous, M. M., and Šimůnek, J. (2010b). Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. Agricultural Water Management, 97(7), 1070-1076. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.02.012
- Kandelous, M.M., Simunek, J., Van Genuchten, M., and Malek, K. (2011). Soil Water Content Distributions between Two Emitters of a Subsurface Drip Irrigation System. *Soil Science Society of America Journal*. 75. 488-497. DOI: 10.2136/sssaj2010.0181.
- Malek, K., and Peters, R. T. (2011). Wetting Pattern Models for Drip Irrigation: New Empirical Model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 137(8), 530-536. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000320
- Nafchi, R. F., Mosavi, F., and Parvanak, K. (2011). Experimental Study of Shape and Volume of Wetted Soil in Trickle Irrigation Method. *African Journal of Agricultural Research*, **6**(2), 458-466. DOI: 10.5897/AJAR10.727
- Schwartzman, M., and Zur, B. (1986). Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **112**(3), 242–253. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:3(242)
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., Simunek, J., and Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **130**(4), 304-310. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(304)
- Soulis, K., and Elmaloglou, S. (2018). Optimum soil water content sensors placement for surface drip irrigation scheduling in layered soils. *Computers and Electronics in Agriculture*, 152, 1-8. DOI: 10.1016/j.compag.2018.06.052.
- Subbaiah, R. (2013). A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*, 31, 225–258. DOI: 10.1007/s00271-011-0309-x

5 APLICACIÓN DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES EN LA MEDICIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL

El presente capítulo de Tesis fue publicado en octubre del 2021 en las "MEMORIAS DEL 10º CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS (MESA 1 MATEMÁTICAS Y FÍSICA). UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, MÉXICO".

También el presente capítulo de Tesis fue publicado en 2022 como capítulo de libro en INFORMACIÓN, ESTABILIDAD Y DINÁMICA EN LOS MODELOS ECONÓMICOS, ASOCIACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN INTERDISCIPLINARIA A.C. MÉXICO.

Para el quinto capítulo de Tesis se tomó la estructura y formato solicitado por el comité editorial del Congreso y por la Asociación Mexicana de Investigación Interdisciplinaria A.C. La información del Quinto capítulo se citará dando prioridad a cualquiera de las publicaciones previas.

APA

Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Salazar-Moreno, R. y Martínez-Ruiz, A. (2021). Aplicación de redes neuronales artificiales en la medición de las dimensiones del bulbo húmedo en riego por goteo superficial. *Décimo congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas*, Universidad Autónoma Chapingo, México, 21 y 22 de octubre de 2021. 50 pp.

Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Salazar-Moreno, R., & Martínez-Ruiz, A. (2022). Aplicación de redes neuronales artificiales en la medición de las dimensiones del bulbo húmedo en riego por goteo superficial. F. Pérez-Soto, E. Figueroa-Hernández, R. Salazar-Moreno, D. Sepúlveda-Jiménez, P. Escamilla-García, & M. Jiménez-García (copiladores). *INFORMACIÓN, ESTABILIDAD Y DINÁMICA EN LOS MODELOS ECONÓMICOS* (pp. 76-89). Asociación Mexicana de Investigación Interdisciplinaria A.C. (ASMIIA, A.C.). ISBN: 978-607-99921-2-5.

Aplicación de redes neuronales artificiales en la medición de las dimensiones del bulbo húmedo en riego por goteo superficial

Irouri Cristóbal Muñoz¹ Jorge Víctor Prado Hernández² Raquel Salazar Moreno³ Antonio Martínez Ruiz⁴

Mesa: 1 Matemáticas y Física

Resumen

En las últimas décadas se ha incrementado la exigencia a la agricultura de tener mayores rendimientos con un menor consumo de agua. La tecnología de riego por goteo puede ayudar a enfrentar este desafío y para ello es necesario optimizar aspectos de diseño y operación, donde la información del patrón de humedecimiento juega un papel fundamental. Es deseable contar con información de la geometría del bulbo de mojado, obtenida de forma directa en experimentos de campo o laboratorio; sin embargo, ello resulta complicado y costoso. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación fue implementar dos Redes Neuronales Artificiales (ANN), capaces de estimar adecuadamente el ancho y la profundidad de mojado en riego por goteo superficial en un suelo de textura franco arcillo arenosa con emisores de diferentes caudales. Para la implementación de las ANN se utilizó un perceptrón multicapa con una sola capa oculta y se compararon diferentes algoritmos de retropropagación. Se probaron diferentes cantidades de nodos en la capa oculta, calculadas con cuatro criterios empíricos. Los mejores resultados se obtuvieron con el número de neuronas (seis) calculado con el criterio del promedio y la función trainlm (Levenberg-Marquardt backpropagation). Se lograron implementar dos ANN óptimas que predicen aceptablemente la evolución temporal de las magnitudes vertical y horizontal del bulbo de humedecimiento, vislumbrando este enfoque de modelación como una herramienta potencial en la gestión del riego por goteo, en el que se tendrá que continuar investigando para mejorar sus alcances.

Palabras clave: Inteligencia artificial, geometría del bulbo, modelación del riego, agua en el suelo.

²Profesor-Investigador, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. <u>vpradohdez@gmail.com</u>

¹Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco Km 38.5, Chapingo, México. C.P 56230. <u>irouri.cristobal.munoz@gmail.com</u>

³Profesor-Investigador, Departamento de Maquinaria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. <u>raquels60@hotmail.com</u>

⁴Investigador, INIFAP-CE San Martinito Santa Rita Tlahuapan, Puebla, Pue. C.P. 74100. <u>amartinezr8393@gmail.com</u>

Abstract

In recent decades, the demand for agriculture to have higher yields with less water consumption has increased. Drip irrigation technology can help to face this challenge and for this it is necessary to optimize design and operation aspects, where the information of the wetting pattern plays a fundamental role. It is desirable to have information on the geometry of the fountain bulb, obtained directly in field or laboratory experiments; however, this is complicated and expensive. For this reason, the objective of this research was to implement two Artificial Neural Networks (ANN), capable of adequately estimating the width and depth of wetting in surface drip irrigation in a sandy clay loam soil with emitters of different flow rates. For the implementation of the ANN, a multilayer perceptron with a single hidden layer was used and different backpropagation algorithms were compared. Different numbers of nodes were tested in the hidden layer, calculated with four empirical criteria. The best results were obtained with the number of neurons (six) calculated with the average criterion and the trainlm function (Levenberg-Marquardt backpropagation). It was possible to implement two optimal ANN that acceptably predict the temporal evolution of the vertical and horizontal magnitudes of the wetting bulb, envisioning this modeling approach as a potential tool in drip irrigation management, in which further research will have to be done to improve its scopes.

Keywords: Artificial intelligence, bulb geometry, irrigation modeling, water in the soil.

Introducción

En México la agricultura es el sector que más agua consume en el país, la demanda de agua por este sector se incrementó en 15.4% entre 2001 y 2014; de seguir con esta tendencia se pronostica un escenario bastante desfavorable en la disponibilidad de agua para el año 2030. Debido a esta restricción uno de los aspectos de mayor relevancia nacional es reducir el consumo de agua en relación a la producción obtenida (SEMARNAT, 2016). La tecnología de riego por goteo puede ayudar a enfrentar este desafío, dando a los productores un mayor control sobre la aplicación de agua e insumos (Subbaiah & Mashru, 2013). Para lograr el máximo beneficio que ofrece la tecnología del riego por goteo, se requiere optimizar aspectos de diseño y operación, como el espaciamiento de instalación de los emisores, caudales de los emisores, frecuencia y tiempo del riego (Skaggs, Trout, Šimůnek & Shouse, 2004).

La técnica de aplicación del riego por goteo se ha empleado y estudiado en muchos lugares alrededor del mundo (Venot et al., 2014). Con esta técnica el agua se conduce hasta la planta y es entregada puntualmente al suelo con emisores de baja presión, anulando las pérdidas por coleos, minimizando las pérdidas por conducción y con potencial de minimizar las pérdidas por percolación profunda y evaporación (Ayars, Fulton & Taylor, 2015). El objetivo de esta forma de aplicación de riego es suministrar agua a un volumen de suelo limitado en la zona activa de absorción de las raíces (Amin & Ekhmaj, 2006). Las principales ventajas del riego por goteo sobre otras técnicas de aplicación de riego, es la alta eficiencia de aplicación (90%) y el mantenimiento relativamente constante del nivel de humedad en la zona de raíces, provocando un aumento considerable en la producción de muchos cultivos (Waller & Yitayew, 2016).

La geometría del bulbo de mojado del agua en el suelo es uno de los aspectos importantes del diseño y operación del riego por goteo (Hammami, Daghari, Balti & Maalej, 2002),

pues con dicha información se puede establecer el espaciamiento óptimo entre emisores para mejorar la aplicación de agua en el sistema radicular de la planta. En cuestiones prácticas de diseño y operación del riego por goteo superficial, el bulbo de mojado puede ser definido por su profundidad y su ancho en la superficie del suelo (Malek & Peters, 2011). La distribución del agua del bulbo de mojado se puede obtener por tres medios: a través de mediciones en experimentos en campo, con mediciones en modelos físico experimentales en laboratorio, y con el uso de modelos matemáticos (Cruz-Bautista et al., 2016).

En el caso de los experimentos de riego en campo, si no se cuenta con el equipo adecuado que evite realizar excavaciones en el suelo en los sitios de observación, se pueden presentar algunas desventajas: (1) alteraciones de las condiciones físicas del suelo, (2) las observaciones se limitan únicamente a un tiempo de riego, ya que si se usa un sitio excavado previamente para todas las observaciones temporales se corre el riesgo de modificar la dinámica del movimiento del agua en el suelo, porque la cara del suelo de observación quedaría expuesta al ambiente directamente, y (3) dificultad para la identificación del frente de humedecimiento si la condición inicial de humedad es alta.

El uso de sensores de humedad del suelo en la medición de la distribución de humedad en riego por goteo es una buena alternativa para este problema, siempre que estos sean precisos y permitan medir con alta frecuencia la evolución espacio-temporal de la humedad en el suelo, pero es necesario contemplar un especial cuidado en su instalación y uso, además del costo de su adquisición. La principal limitación del uso de sensores en experimentos de campo en comparación a su uso en laboratorio, es el no poder obtener directamente la profundidad de mojado del bulbo húmedo, y en el caso del riego por goteo subsuperficial no poder obtener la profundidad y ancho de mojado sin alterar los sitios de observación en los experimentos. Una excelente opción para resolver este problema es el uso de Redes Neuronales Artificiales (ANN), considerando los trabajos del modelado de infiltración en riego por goteo con ANN realizados por Lazarovitch, Poulton, Furman & Warrick (2009), Neto, Teixeira, Braga, Santos & Leão (2015). Elnesr & Alazba (2017) y Karimi, Mohammadi, Sanikhani, Salih & Yaseen (2020).

Las ANN son técnicas robustas de reconocimiento de patrones que se pueden utilizar para relacionar un sistema de entradas y salidas, cuando las relaciones físicas para describir el sistema son muy complejas. Este conocimiento inspiró a los científicos a realizar experimentos utilizando ANN en la primera mitad de la década de 1990 y sus prometedores resultados llevaron a adoptar esta técnica para resolver muchos problemas de campos orientados; un ejemplo de esto es su aplicación en la modelación de fenómenos hidrológicos (Kumar, Raghuwanshi & Singh, 2011). La mayoría de los estudios han demostrado que las ANN pueden superar a las técnicas estadísticas tradicionales y producir resultados comparables a los modelos conceptuales. Sin embargo, el campo del modelado de infiltración bajo riego por goteo utilizando ANN se encuentra todavía en una etapa temprana de desarrollo, y sigue siendo un tema de investigación en curso, por lo que, se necesita más investigación para apoyar la discusión sobre el valor de estas técnicas en este campo y para ayudar a desarrollar todo su potencial (Subbaiah, 2013).

Un modelo de red neuronal es una construcción matemática con una arquitectura que está altamente estructurada, y tiene capacidades de aprendizaje y generalización que intentan imitar los mecanismos neurológicos del cerebro humano (Figura 1). Los componentes

básicos de una ANN son elementos de procesamiento (neuronas artificiales) dispuestos en capas y pesos de conexión entre capas de neuronas adyacentes. La primera capa de neuronas se llama capa de entrada y la última capa se llama capa de salida, y las capas situadas entre las capas de entrada y salida se denominan capas ocultas. Los parámetros de entrada se transmiten a través de conexiones que multiplican sus puntos fuertes por pesos para formar entradas ponderadas. La capa de entrada recibe los parámetros de entrada y los distribuye a las neuronas en la siguiente capa sin hacer ningún cálculo (Li, Yoder, Odhiambo & Zhang, 2004). Las neuronas de las capas oculta y de salida constan de dos partes, la primera parte simplemente agrega las entradas ponderadas; la segunda parte es esencialmente un filtro no lineal, generalmente llamado función de transferencia o función de activación, el cual limita el valor de la salida de una neurona artificial a un valor entre dos asíntotas (Kumar et al., 2011).



Figura 1. Representación esquemática de una neurona biológica (a) y una neurona artificial (b).

Fuente: Kumar et al. (2011).

Las ANN están capacitadas para realizar funciones complejas ajustando los pesos de conexión entre neuronas. Por lo general, las ANN se ajustan o entrenan de modo que una entrada particular conduzca a productos objetivo, los pesos de las conexiones se ajustan en función de una comparación de los ejemplos de entrada y las salidas esperadas. El objetivo es minimizar la diferencia entre la entrada y los valores de salida esperados, utilizando algoritmos de entrenamiento, porque los pesos iniciales se asignan aleatoriamente a las conexiones, entonces la diferencia entre la predicción y lo deseado pueden ser grandes. Por lo tanto, el aprendizaje implica ajustar iterativamente los pesos de conexión para minimizar estas diferencias (Li et al., 2004).

Las ANN tienen las siguientes ventajas (Subbaiah, 2013): (a) pueden simular la no linealidad en un sistema, (b) pueden distinguir eficazmente lo relevante y lo irrelevante de la información, (c) no requieren necesariamente la suposición o aplicación de restricciones o una solución a priori, (d) tienen demandas computacionales relativamente bajas y se pueden integrar fácilmente con otras técnicas, debido a su estructura de modelación compacta y flexible, (e) cuando un elemento de la ANN falla, puede continuar sin ningún problema debido a su naturaleza paralela, y (f) una ANN aprende y no tiene que ser reprogramada.

Por todo lo anterior, el objetivo de esta investigación fue implementar dos ANN óptimas, capaces de estimar la dimensión horizontal (ancho) y vertical (profundidad) del bulbo de mojado en suelos bajo riego por goteo superficial, con una precisión y exactitud aceptables.

Materiales y métodos

A partir de las experiencias obtenidas por Lazarovitch et al. (2009), Neto et al. (2015), Elnesr & Alazba (2017) y Karimi et al. (2020) se decidió utilizar un perceptrón multicapa (PM) con una sola capa oculta (Figura 2). Las ANN se implementaron en el software Matlab versión 9.8 con diferentes algoritmos de retropropagación para el entrenamiento del PM, ejecutados con las funciones: trainlm (Levenberg-Marquardt backpropagation), trainbfg (BFGS quasi-Newton backpropagation) y traincgf (Conjugate gradient backpropagation with Fletcher-Reeves update). Para el aprendizaje de las redes se utilizaron el gradiente descendente con y sin momento (learngdm y learngd). En la capa oculta se aplicó una función de transferencia tangente sigmoidal y en la capa de salida una función de transferencia lineal.

Figura 2: Arquitectura típica de un Perceptrón Multicapa.



Fuente: Ekhmaj, Abdulaziz & Almdny (2007).

Para encontrar el número de neuronas óptimo en la capa oculta, se probaron diferentes cantidades de nodos en dicha capa, obtenidas con los siguientes criterios empíricos;

1. Regla de la pirámide geométrica.

nodos de capa oculta = $\sqrt{nodos (capa entrada) * nodos (capa salida)}$ (1)

2. Promedio.

nodos do capa ogulta – nodos (capa entrada) + nodos (capa salida)	(2)
<i>100005 de capa ocuita – 2</i>	(2)
3. Teorema de Kolmogorov.	
nodos de capa oculta = 2 * nodos (capa entrada) + 1	(3)
4. Regla empírica.	
nodos de capa oculta = nodos (capa entrada)	(4)

En la construcción y evaluación de los modelos de ANN se utilizó la información obtenida por Cristóbal-Muñoz (2019), donde se generó información del patrón de humedecimiento en riego por goteo superficial en un suelo de textura franco arcillo arenosa, con sensores de humedad y un modelo físico-experimental de paredes transparentes (Figura 3). Se tomó la información de cuatro riegos con tres tasas de descarga del emisor (1.44, 2.90 y 3.75 litros por hora).

Figura 3: Sistema experimental con acotaciones en centímetros.



Fuente: Cristóbal-Muñoz (2019).

Se generó una matriz de 1354 x 13 datos, donde las 13 columnas son el tiempo de riego, caudal del emisor, ancho de mojado (d), profundidad de mojado (z) y las lecturas de humedad volumétrica de los sensores 3, 4, 7, 9, 10, 11, 13, 14 y 15. A partir de esta matriz se crearon dos condiciones para las ANN, la primera es cuando la variable de salida es la profundidad de mojado y las entradas son el resto de variables, sin contemplar el ancho de mojado. La segunda es cuando la variable de salida es el ancho de mojado y las entradas son el resto de variables, sin contemplar la profundidad de mojado. Los datos se dividieron aleatoriamente en dos partes: entrenamiento (90%) y evaluación (10%). El entrenamiento fue dividido en capacitación (60%), validación (20%) y pruebas (20%). Además, se

realizó una prueba práctica del funcionamiento de las ANN obtenidas; para ello se utilizaron datos distintos a los usados en el entrenamiento y evaluación de las ANN, analizando los últimos 40 minutos de un riego en el mismo sistema experimental y con una descarga del emisor de 3.75 litros por hora.

La evaluación de las capacidades predictivas de las ANN se hizo con la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (EF) (Willmott, Robeson & Matsuura, 2012):

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)^2\right]^{1/2}$$
(5)

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} (O_i - \overline{O})^2}$$
(6)

donde, N es el número total de datos, P_i corresponde al i-ésimo dato estimado, O_i es el i-ésimo dato observado y \bar{O} es la media de los datos observados.

Según los valores del indicador EF, el desempeño del modelo puede calificarse como (Ritter & Muñoz-Carpena, 2013): insatisfactorio (EF< 0.65), aceptable ($0.65 \le EF < 0.80$), bueno ($0.80 \le EF < 0.90$), y muy bueno ($EF \ge 0.90$).

Resultados y discusión

El número de neuronas probadas en la capa oculta fueron 4, 6, 11 y 23, calculados con los criterios empíricos 1, 2, 4 y 3, respectivamente. En el Cuadro 1 se aprecian las eficiencias y las raíces de los errores cuadráticos medios, usando los posibles números de nodos en la capa oculta y la función trainlm, combinado con un aprendizaje con el gradiente descendente con momento. Se observaron excelentes resultados para todas las opciones posibles, por lo tanto, se descarta la opción de utilizar 23 nodos en la capa oculta, debido a que siempre se busca tener los mejores resultados con una arquitectura simple de la red neuronal.

Numero de nodos en	Profundidad de	e mojado (z)	Ancho de mo	Ancho de mojado (d)		
la capa oculta	RMSE (cm)	EF	RMSE (cm)	EF		
4	0.1438	0.9997	0.7088	0.9983		
6	0.1254	0.9998	0.2325	0.9998		
11	0.0905	0.9999	0.3106	0.9997		
23	0.1053	0.9998	0.5349	0.9990		

Cuadro 1. Indicadores estadísticos usando trainlm y learngdm.

En el Cuadro 2 se aprecian los resultados del entrenamiento de las ANN, en la predicción de la profundidad y ancho de mojado se obtuvieron los mejores resultados al realizar el entrenamiento con la función trainlm y un aprendizaje con el gradiente descendente con y sin momento. Por lo tanto, se escogieron las redes entrenadas con la función trainlm para la evaluación y la prueba práctica de las ANN.

Nodos			Pro	fundidad	(z)	Ancho (d)		
(capa oculta)	Aprendizaje	Entrenamiento	RMSE (cm)	EF	Itera- ciones	RMSE (cm)	EF	Itera- ciones
		Trainlm	0.1370	0.9997	67	0.5923	0.9988	120
	Learngd	Trainbfg	0.5324	0.9956	58	2.8465	0.9720	45
4		Traincgf	0.7886	0.9903	67	2.7961	0.9730	86
4		Trainlm	0.1419	0.9997	599	0.7472	0.9981	50
	Learngdm	Trainbfg	0.3989	0.9975	132	3.5997	0.9553	25
		Traincgf	0.7559	0.9910	59	3.0975	0.9669	39
	Learngd	Trainlm	0.1108	0.9998	73	0.5922	0.9988	39
		Trainbfg	0.3680	0.9979	93	2.5443	0.9777	39
		Traincgf	0.4819	0.9964	144	2.9419	0.9701	53
0	Learngdm	Trainlm	0.1541	0.9996	45	0.3706	0.9995	247
		Trainbfg	0.6541	0.9933	71	2.8621	0.9717	42
		Traincgf	0.5993	0.9944	85	2.7511	0.9739	56
		Trainlm	0.0692	0.9999	90	0.4151	0.9994	200
	Learngd	Trainbfg	0.3764	0.9978	129	2.4536	0.9792	41
		Traincgf	0.6159	0.9941	71	1.3214	0.9940	170
11		Trainlm	0.1468	0.9997	37	0.1555	0.9999	180
	Learngdm	Trainbfg	0.3569	0.9980	104	1.0538	0.9962	156
		Traincgf	0.4354	0.9970	163	1.9076	0.9874	150

Cuadro 2. Indicadores estadísticos de las ANN en el entrenamiento.

En el caso de la evaluación, todas las redes seleccionadas obtuvieron excelentes resultados (Cuadro 3), pero en la prueba práctica los resultados no fueron tan buenos (Cuadro 4), ya que se obtuvieron resultados aceptables solo en tres redes, dos en la predicción de la profundidad de mojado (trainlm y learngd con 4 y 6 nodos en la capa oculta) y una en el caso del ancho de mojado (trainlm y learngdm con 6 nodos en la capa oculta). Estos resultados comprobaron lo dicho por Subbaiah (2013), quien afirma que la minimización de errores en la fase de entrenamiento y evaluación de las ANN, no implica necesariamente un buen desempeño operativo. Lo anterior sugiere la necesidad de continuar investigando la aplicación de las ANN en la modelación de la geometría del bulbo de mojado en riego por goteo. En la Figura 4 se observa lo predicho por las ANN óptimas encontradas contra los datos observados de la prueba práctica.

Numero de nodos		Profundi	idad (z)	Ancho (d)		
en la capa oculta	Aprendizaje	RMSE (cm)	EF	RMSE (cm)	EF	
1	Learngd	0.4747	0.9963	0.7971	0.9980	
4	Learngdm	0.4891	0.9961	1.4639	0.9934	
6	Learngd	0.4351	0.9969	0.7476	0.9983	
0	Learngdm	0.5540	0.9950	0.7126	0.9984	
11	Learngd	0.2331	0.9991	0.7886	0.9981	
11	Learngdm	0.5066	0.9958	1.7997	0.9900	

Cuadro 3. Indicadores estadísticos de las ANN (trainlm) en la evaluación.

Cuadro 4. Indicadores estadísticos de las ANN (trainlm) en la prueba práctica.

Numero de nodos		Profun	didad (z)	Ancho (d)		
en la capa oculta	Aprendizaje	lizaje RMSE (cm) EF		RMSE (cm)	EF	
1	Learngd	0.8428	0.6539	25.3167	-51.1813	
4	Learngdm	3.3646	-4.6742	12.8605	-12.4657	
6	Learngd	0.7127	0.7454	2.8255	0.3500	
0	Learngdm	2.1305	-1.2751	1.8282	0.7279	
11	Learngd	7.5947	-27.9110	21.4933	-36.6113	
11	Learngdm	3.4863	-5.0923	13.8033	-14.5124	





En las Figuras 5 y 6 se muestran la arquitectura de las redes óptimas encontradas, los resultados obtenidos de las redes óptimas fueron excelentes en comparación a los resultados encontrados por Cristóbal-Muñoz, Prado-Hernández y Cristóbal-Acevedo (2020) en la predicción de la geometría del bulbo de mojado, a partir de mediciones de sensores de humedad del suelo y el método de Kriging con el software Surfer 10, donde los valores de RMSE oscilaron entre 3.4 a 8.7 cm y 4.4 a 12.9 cm en la predicción de la profundidad y del ancho de mojado, respectivamente.









Conclusiones

Se implementaron dos ANN capaces de predecir las dimensiones del bulbo de humedecimiento con una precisión y exactitud aceptable, comprobando que las ANN pueden ser una buena opción para obtener la profundidad y ancho de mojado en situaciones donde no se pueden medir directamente. Los mejores resultados se obtuvieron con seis neuronas en la capa oculta y la función trainlm, con un aprendizaje con la función learngd y learngdm para la profundidad y ancho de mojado, respectivamente.

La aplicación de ANN en la modelación de riego se encuentra en una etapa temprana de desarrollo, por lo que se necesita más investigación de este tema para lograr visualizar todo su potencial.

Agradecimientos

Se agradece a la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo por el apoyo otorgado para la adquisición del sistema experimental.

Literatura citada

Revistas

Ayars, J.E., Fulton, A., & Taylor, B. (2015). Subsurface drip irrigation in California— Here to stay?. *Agricultural Water Management*, 157, 39-47. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.01.001

Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., & Siller-González, M. (2016). Validación de un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo con riego por goteo. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(1), 45-55.

Elnesr, M.N., & Alazba, A.A. (2017). Simulation of water distribution under surface dripper using artificial neural networks, *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 90-99. DOI: 10.1016/j.compag.2017.10.003

Hammami, M., Daghari, H., Balti, J., & Maalej, M. (2002). Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: Theory and numerical aspect. *Irrigation and Drainage*, 51(4), 347-360. DOI: 10.1002/ird.60

Karimi, B., Mohammadi, P., Sanikhani, H., Salih, S. Q., & Yaseen, Z. M. (2020). Modeling wetted areas of moisture bulb for drip irrigation systems: An enhanced empirical model and artificial neural network, *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105767. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105767

Kumar, M., Raghuwanshi, N.S., & Singh, R. (2011). Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: a review. *Irrigation Science*, 29, 11-25. DOI:10.1007/s00271-010-0230-8

Lazarovitch, N., Poulton, M., Furman, A., & Warrick A. W. (2009). Water distribution under trickle irrigation predicted using artificial neural networks. *J Eng Math* 64, 207–218. DOI: 10.1007/s10665-009-9282-2

Li, J., Yoder, R.E., Odhiambo, L.O., & Zhang, J. (2004). Simulation of nitrate distribution under drip irrigation using artificial neural networks. *Irrig Sci*, 23, 29–37. DOI: 10.1007/s00271-003-0090-6

Malek, K., & Peters, R. T. (2011). Wetting Pattern Models for Drip Irrigation: New Empirical Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(8), 530-536. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000320

Neto, O. C. D. R., Teixeira, A. D. S., Braga, A. P. S., Santos, C. C. D., & Leão, R. A. O. (2015). Application of artificial neural networks as an alternative to volumetric water balance in drip irrigation management in watermelon crop. *Engenharia Agrícola*, 35(2), 266-279. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n2p266-279/2015

Ritter, A., & Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33–45. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.004

Skaggs, T. H., Trout, T. J., Šimůnek, J., & Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(4), 304-310. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(304) Subbaiah, R, & Mashru, H.H. (2013). Modeling for predicting soil wetting radius under point source surface trickle irrigation. Agricultural Engineering International: *The CIGR Journal*, 15(3), 1-10.

Subbaiah, R. (2013). A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*, 31, 225–258. DOI: 10.1007/s00271-011-0309-x

Venot, J. P., Zwarteveen, M., Kuper, M., Boesveld, H., Bossenbroek, L., Kooij, S.V.D., Wanvoeke, J., Benouniche, M., Errahj, M., Fraiture, C.D. & Verma, S. (2014), BEYOND THE PROMISES OF TECHNOLOGY: A REVIEW OF THE DISCOURSES AND ACTORS WHO MAKE DRIP IRRIGATION. *Irrigation and Drainage*, 63(2), 186-194. DOI: 10.1002/ird.1839

Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), 2088–2094. DOI: 10.1002/joc.2419

Libros

SEMARNAT. (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. Semarnat. México. 380-381.

Waller, P., & Yitayew, M. (2016). Introduction In: Waller, P. and Yitayew, M., Eds., *Irrigation and Drainage Engineering* 1-18. Switzerland: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-05699-9_1

Congresos y conferencias

Amin, M. S. M., & Ekhmaj, A. I. M. (2006). DIPAC-Drip Irrigation Water Distribution Pattern Calculator. *7th International Micro Irrigation Congress*, 10-16 Sept., Pwtc, Kuala Lumpur, Malaysia.

Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., & Cristóbal-Acevedo, D. (2020). "Geometría del bulbo de mojado de riego por goteo a partir de sensores de humedad de suelo". *Memoria del VIII Congreso Internacional y XXII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas*. Chapingo, México. 417-418.

Ekhmaj, A. I., Abdulaziz, A. M., & Almdny, A. M. (2007). Artificial neural networks approach to estimate wetting pattern under point source trickle irrigation. *African Crop Science Conference Proceedings*, 8, 1625-1630. ISSN 1023-070X

Tesis

Cristóbal-Muñoz, I. (2019). *Medición y análisis del patrón de humedecimiento en riego por goteo superficial en un suelo franco arcillo arenoso*. Tesis de licenciatura, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, México: 45-63.

6 AN IMPROVED EMPIRICAL MODEL FOR ESTIMATING THE GEOMETRY OF THE SOIL WETTING FRONT WITH SURFACE DRIP IRRIGATION

El presente capítulo de Tesis fue publicado en junio del 2022 en la revista WATER, MDPI, BASEL, SWITZERLAND. ISSN: 2073-4441.

Para el sexto capítulo de Tesis se tomó la estructura y formato solicitado por la revista. La información del Sexto capítulo se citará dando prioridad a la publicación previa.

APA

Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Martínez-Ruiz, A., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., & Cristóbal-Muñoz, D. (2022). An Improved Empirical Model for Estimating the Geometry of the Soil Wetting Front with Surface Drip Irrigation. Water, 14(11), 1827. DOI: 10.3390/w14111827 Article

An Improved Empirical Model for Estimating the Geometry of the Soil Wetting Front with Surface Drip Irrigation

Irouri Cristóbal-Muñoz ¹, Jorge Víctor Prado-Hernández ^{1,2,*}, Antonio Martínez-Ruiz ^{3,*}, Fermín Pascual-Ramírez ⁴, David Cristóbal-Acevedo ² and David Cristóbal-Muñoz ⁵

- ¹ Programa de Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco CP 56230, Mexico; irouri.cristobal.munoz@gmail.com
- ² Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco CP 56230, Mexico; cristobalacevdo@yahoo.com.mx
- ³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo experimental Tecamachalco, Puebla CP 75484, Mexico
- ⁴ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de Méxicocampus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Morelia CP 58190, Mexico; fpascualr@cieco.unam.mx
- Informatics Chair Group, Biosystems Engineering Department, Wageningen University & Research, 6708 PB
 Wageningen, The Netherlands; david_cristobalm@outlook.com
- * Correspondence: jpradoh@chapingo.mx (J.V.P.-H.); amartinezr8393@gmail.com (A.M.-R.)

Abstract:

Wetting pattern geometry is useful in determining the spacing between emitters and the irrigation time in drip irrigation systems. This research aimed to generate an empirical model to estimate the width and depth of the wetting front in surface drip irrigation based on experimental tests in a cube-shaped container with transparent walls in soils with a sandy clay loam texture, with hydraulic conductivities from 2.316 to 3.945 cm h⁻¹, and organic matter contents from 1.7 to 2.8%, and different irrigation conditions: discharge rates of 1.44, 2.90, 3.00, 3.75, and 4.00 l h⁻¹, initial moisture levels between permanent wilting point and field capacity, and irrigation times from 0.58 to 9.50 h. The experimental conditions and the strategy for measuring the wetting front and soil moisture are detailed so the experiment is verifiable. The proposed model performed better than five other empirical models, with average values of 3 cm for the root mean square error and 0.88 for the Nash and Sutcliffe efficiency coefficient. The generated model is efficient and simple and can be a very useful tool for the design and operation of surface drip irrigation systems in soils with conditions similar to those of this study.

Keywords: wetted bulb; wetting front; irrigation modeling; irrigation operation; water in soil

1. Introduction

Due to the high consumption of water available for agriculture, the low efficiency of its use worldwide, and strong competition for this resource by different sectors, agriculture is being called on to optimize food production by using less water without degrading soil and water resources [1]. Drip irrigation technology can help meet this challenge by providing growers greater control over the application of water, fertilizers, and pesticides [2]. Realizing the potential offered by drip irrigation technology requires optimizing its design and operational aspects, such as the frequency and duration of irrigation, emitter spacing, and emitter discharge rates [1].

The drip irrigation application technique is currently used in many parts of the world [3]. With this technique water is conveyed to the plant and delivered in an area-specific manner to the soil with low-pressure emitters, minimizing conduction losses and eliminating surface runoff losses with the potential to minimize losses due to deep percolation and

Citation: Cristóbal-Muñoz, I.; Prado-Hernández, J.V.; Martínez-Ruiz, A.; Pascual-Ramírez, F.; Cristóbal-Acevedo, D.; Cristóbal-Muñoz, D. An Improved Empirical Model for Estimating the Geometry of the Soil Wetting Front with Surface Drip Irrigation. *Water* 2022, *14*, 1827.

https://doi.org/10.3390/w14111827

Academic Editor(s): Sara Álvarez and Cristina Romero-Trigueros

Received: 10 May 2022 Accepted: 2 June 2022 Published: 6 June 2022

Publisher'sNote:MDPIstaysneutral with regard to jurisdictionalclaims in published maps andinstitutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/license s/by/4.0/). evaporation [4,5]. The objective of this form of irrigation application is to supply water to a limited soil volume in the active root uptake zone, improving nutrient utilization and the effectiveness of pest and disease control [6]. Exploiting the advantages offered by this form of irrigation application requires knowledge and experiences different from those required in other forms of irrigation application that, when not considered, can generate irrigation systems with poor design and operation [7].

In recent years, great strides have been made in the design, technology, and operation of drip irrigation systems, largely due to a better understanding of water movement in the soil [8]. One important aspect to consider in the design and operation of drip irrigation is the geometry of the wetting pattern in the soil [9] since with this information the optimal spacing between emitters to cover the plant's root system can be determined [10].

With knowledge of the wetting front geometry of the water in the soil, the emitter or emitters can be properly located so that the plant can consume water and nutrients efficiently, with lower costs for cultural work and higher income from increased yield [2,6,11]. Practically, for the design and operation of surface drip irrigation, the geometry of the wetting front can be defined by its width at the soil surface and its depth [12,13].

The water distribution of the wetting pattern generated by an emitter can be obtained by three means: through measurements in in situ experiments, with measurements in physical experimental models in the laboratory, and with the use of mathematical models [10]. Mathematical models can be classified into three main groups: numerical, analytical, and empirical [14-17]. In all mathematical models, it is essential to evaluate them in order to know their scope and limitations.

The most complex mathematical models are those based on the Richards equation, resulting from the application of the principle of conservation of mass in a partially saturated soil volume [3,14]. The high nonlinearity of this equation prevents its analytical solution, so numerical methods are used instead. Its solution requires the definition of starting conditions, boundary conditions, and detailed meteorological, soil, and crop information, and considerable computational power, which may limit its practical application [2,18-21]. Analytical models are usually derived from the Richards equation, applying simplifying assumptions such as the Green and Ampt equation [22]; whereas empirical models benefit from their simplicity, having parameters that are more understandable to irrigation technicians and that are usually easy to obtain, making them more convenient to be used in field applications [6,21,23].

In recent decades, several empirical models have been proposed to estimate the geometry of the wetting front (width and depth) of drip-irrigated soil. Most of them were generated from data collected in situ (in the field) with different experimental conditions [6,10,12,13,24]. The effectiveness of these models is reduced when they are used in soils other than those in which they were developed [16], so researchers should specify the conditions of their validity. Another limitation of these models is that they were generated considering a single value or a reduced range of soil moisture prior to irrigation, ignoring that in reality water is applied in different initial moisture conditions since long-duration sowing irrigations are applied where soils are usually dry; later short-duration and frequent irrigations cover the evapotranspiration demand of the crop for short periods seeking high moisture close to field capacity before and after irrigation.

If the proper equipment is not available to avoid digging in the soil at observation sites in field irrigation experiments, there may be some disadvantages: (1) disturbance of soil physical conditions and water dynamics, (2) difficulty in identifying the wetting front if the initial moisture condition is high, and (3) observations are limited to only one irrigation time. Temporal monitoring of the wetted front requires a different sampling site for each observation time since using the excavated site for the first observation time in subsequent temporal observations would risk modifying the dynamics of water movement in the soil because the soil face for observation and measurement would be directly exposed to the environment. These methodological details, for observations of the advance of the wetting front, are not indicated or are not specified in many studies.

Due to the previously mentioned drawbacks and the advancement of soil moisture measurement technologies, some researchers have conducted drip irrigation experiments in controlled environments. They obtained satisfactory results from physical models with transparent walls where they were able to observe the wetting patterns of a point source irrigation system in real time and without physically disturbing the soil during the measurements [8,14,16,25,26]. However, some factors were ignored, such as evaporation from the soil surface and the presence of aggregates greater than 2 mm in diameter in agricultural soils, creating conditions different from those presented in the field, limiting the applicability of the information generated under standard irrigation conditions.

The previously mentioned background of field and laboratory studies shows limitations in their scope since several of them offer few methodological details of the experiments, such as: they only partially describe the characteristics of the soils and in some cases the procedures for their determination are not indicated, the irrigation conditions are not clarified, and the way of measuring the water content in the soil and the wetting front is not precisely explained. In addition, the mathematical models reported by some researchers were generated with information taken from different researchers and studies [6,13,24] without relying on their own information, which can lead to erroneous conclusions due to an incorrect interpretation of their results and the methodologies used to obtain them. For this reason, this research explores the possibility of obtaining a mathematical model that improves the estimates of the soil wetting front in drip irrigation, based on experimental information obtained with a common and careful methodological strategy, in soils with different physical characteristics and subjected to different irrigation conditions.

Therefore, the objective of this research was to generate an improved empirical mathematical model to estimate the horizontal (width) and vertical (depth) dimension of the wetting front in soils under surface drip irrigation by representing field irrigation conditions in a transparent crystal acrylic cube-shaped container and detailing the conditions of the experiment and the measurement strategy of the parameters involved so that the experiment is replicable and verifiable. This study was carried out under the hypothesis that it is possible to improve the existing estimates of the temporal evolution of the geometry of the soil wetting front with an empirical mathematical model that considers the physical properties of the soil and the characteristics of the irrigation, rigorously executing the designed methodology. The performance of the proposed model was evaluated and compared with other empirical models, proving to be more accurate.

2. Materials and Methods

2.1. Experimental Site

The experiments were conducted at the Irrigation and Drainage Laboratory of the Soil Science Department of Chapingo Autonomous University (UACh), located in Texcoco, State of Mexico.

2.2. Characteristics of the Experimental Soils

The soils were obtained from the experimental agricultural fields at UACh's main campus. Soil samples were air-dried inside a plastic greenhouse and passed through a 6 mm sieve. A sieve with a larger aperture than the one used by Ainechee et al. [8] and Al-Ogaidi et al. [26] was employed in order to achieve conditions similar to those found in the field after lying fallow; in real conditions it is very difficult to find an agricultural soil that does not contain aggregates larger than 2 mm in diameter [27,28].

Table 1 shows the physical properties of the soils used in the experiment. Their texture is sandy clay loam according to the United States Department of Agriculture Soil Conservation Service (US-SCS) classification [29]. The difference in organic matter (OM) content in soils 3 and 4 was generated by the application of corn crop residues in soil 2. Soil bulk density (Pb) was determined with the paraffin-coated clod method, moisture content at field capacity (θ_{CC}) was obtained with the pressure cooker method, moisture content at permanent wilting point (θ_{PMP}) was obtained with the pressure membrane method, and percent organic matter (OM) was measured with the Walkley and Black method.

Co:1	\mathbf{S} and $(0/\mathbf{)}$	Silt (%)	Class (9/)	Рь	θcc	Өрмр	ОМ
5011	Sanu (%)		Clay (%)	(g cm ⁻³)	(cm ³ cm ⁻³)	(cm ³ cm ⁻³)	(%)
1	57.50	22.00	20.50	1.23	0.26	0.14	1.70
2	57.50	22.00	20.50	1.38	0.23	0.13	1.70
3	60.50	18.50	21.00	1.34	0.22	0.13	2.60
4	61.50	18.00	20.50	1.31	0.23	0.14	2.80

Table 1. Physical properties of the study soils.

The hydraulic parameters of the soils used in this study were obtained according to Cruz-Bautista et al. [10] and Kandelous and Šimůnek [14]. They were estimated with the ROSETTA version 1.2 software package [30]. ROSETTA is based on pedo-transfer functions to estimate soil hydraulic parameters from soil physical properties and van Genuchten [31] and Mualem [32] constitutive relations. With the percentages of sand, silt and clay, bulk density, and soil water contents for suction pressures of 33 and 1500 kPa, the residual and saturation moisture contents (θ_r , θ_s), inverse soil air-entry pressure ratio (α), pore size distribution (n), and saturated hydraulic conductivity (K_s) were obtained (Table 2).

Table 2. Hydraulic parameters of the experimental soils obtained with the ROSETTA version 1.2 software package [30].

Soil	$\theta_{\rm r}$	θs	α		Ks
	(cm ³ cm ⁻³)	(cm ³ cm ⁻³)	(cm ⁻¹)	n	(cm h ⁻¹)
1	0.052	0.469	0.026	1.316	3.241
2	0.058	0.428	0.036	1.333	2.316
3	0.065	0.444	0.045	1.363	3.834
4	0.065	0.454	0.044	1.344	3.945

2.3. Experimental System

The soil was placed in a 100 cm × 100 cm × 95 cm transparent crystal acrylic cube-shaped container. The water was driven by a horizontal axis centrifugal pump with a 0.5 HP electric motor, and conducted to the emitter through a 38.1 mm nominal diameter PVC main pipe and a 12 mm nominal diameter low-density polyethylene secondary pipe. A return system and a pressure gauge were installed at the pump discharge to maintain the emitter operating pressure (0.703 kg cm⁻²) (Figure 1).



Figure 1. Experimental system.

The cube-shaped container was filled with soil in 5 cm layers with bulk densities corresponding to the experimental soils shown in Table 1. Holes were drilled in the bottom of the bucket to prevent water stagnation. To prevent preferential flow on the side walls a layer of sand was adhered to them to create a flow surface prior to filling with soil.

The emitter was installed on the soil surface in the center of the cube-shaped container, 10 cm from one of the vertical walls where the evolution of the wetting front geometry was observed (Figure 2). In order to determine soil moisture at the beginning and at the end of irrigation, 16 model S-SMC-M005 moisture sensors (Onset HOBO [®] corporation), with an error of 3%, were installed under the emitter in a 4 by 4 grid on a vertical plane transversal to the observation wall. With this arrangement, the behavior of half of the wetted front was observed and it was assumed that the same occurred in the other half, approaching it mathematically as an asymmetric axis problem [14]; in effect, the wetting front showed that type of behavior in preliminary tests (Figure 2).

Two spacings between soil moisture sensors were used in the installed grid. One of 8 cm horizontal by 8 cm vertical was used to monitor short-duration irrigations and one of 15 cm by 20 cm was used for moderate- and long-duration irrigations (Figure 1).



Figure 2. Observation wall of the wetting front.

Before being installed in the experimental module, the soil moisture sensors were individually calibrated with the soils subjected to the experimental trials, following the procedure recommended by the manufacturer and described by Starr and Paltineanu [33]. After filling the cube-shaped container with soil and installing the sensors, the soil was left to settle for at least 24 h before the first irrigation to allow equilibrium in the moisture distribution, applying irrigation when the differences in the volumetric moisture measurements between sensors were less than 0.015 cm³ cm⁻³.

2.4. Experimental Trials

Two blocks of experiments were carried out based on the magnitude of the irrigation time. Both blocks of the experiment were carried out in a 13-month period. The first experimental block consisted of moderate- and long-duration irrigations (t) with discharge rates (q) of 2.90, 3.75 and 1.44 L per hour (l h⁻¹); the long irrigations were used to try to represent the sowing irrigations in an initially dry soil, with an initial moisture (θ_i) close to permanent wilting point (0.13 to 0.14), while the moderate-duration irrigations were applied with an initial soil moisture close to field capacity (0.22 to 0.26), representing the supply of the daily evapotranspiration demand (Table 3). The second experimental irrigation block consisted of applying short-duration irrigations with 3.00 and 4.00 l h⁻¹ drippers in soils with an initial moisture content close to the permanent wilting point, simulating the short-period supply of the evapotranspiration demand of crops in early vegetative stages where the root system occupies a reduced volume of soil (Table 4). In both irrigation blocks, a final moisture content between field capacity and saturation was guaranteed, a situation commonly carried out by farmers. In Tables 3 and 4 the symbol θ_i represents the average soil moisture content at the end of irrigation.
Irrigation Trial	Irrigation Duration	Soil	q (1 h ⁻¹)	θi (cm ³ cm ⁻³)	θ _f (cm ³ cm ⁻³)	t (h)
1A	Long	1	2.90	0.07	0.42	9.50
2A	Moderate	1	2.90	0.23	0.41	3.00
3A	Moderate	1	3.75	0.24	0.40	2.00
4A	Long	1	1.44	0.14	0.41	8.00

Table 3. Characteristics of the moderate- and long-duration irrigations of the first experimental block.

Table 4. Characteristics of the short-duration irrigations of the second experimental block.

Irrigation Trial	Soil	q	Θ_{i}	θf	t
	5011	(1 h ⁻¹)	(cm ³ cm ⁻³)	(cm ³ cm ⁻³)	(h)
1B	2	4.00	0.09	0.39	0.58
2B	2	3.00	0.13	0.35	0.58
3B	3	4.00	0.10	0.42	0.58
4B	3	3.00	0.09	0.39	0.58
5B	4	4.00	0.13	0.45	0.58
6B	4	3.00	0.07	0.43	0.58

The position of the wetting front was drawn on the observation wall of the cube-shaped container (Figure 3). In the moderate- and long-duration irrigations of the first experimental block, it was performed every 5 min at the beginning of the irrigation, then every 15 min in the intermediate part and finally every 30 min in the final part. In the short-duration irrigations, corresponding to the second block, it was drawn at 5-min intervals. In the irrigation of the first block, the geometry of the wetting front was obtained from the start of irrigation until 12, 36, and 60 h after the end of each irrigation. From these records, the depth and width of the wetting front were determined.



Figure 3. Marking of the wetting front on the observation wall of the soil container.

2.5. Soil Drying after Irrigations

Nafchi et al. [25] stated that evaporation from the soil surface can be ignored in laboratory experiments. However, to minimize the differences between an enclosed site and those presented in the field in an open site, a heat lamp and a fan were installed in this work to simulate the heat generated by radiation and air currents. The fan and the lamp were turned on 60 h after the end of the moderate- and long-duration irrigations (first experimental block

of irrigations). The moisture content at the soil surface was monitored at a depth of 3.8 cm with a Fieldscout TDR 300 soil moisture meter (Spectrum Technologies [®]), whose error is 3%.

2.6. Proposed Empirical Model

An empirical model was proposed to estimate the vertical (depth) and horizontal (width) dimensions of the wetting front, considering the experiences of Schwartzman and Zur [24], Amin and Ekhmaj [6], Malek and Peters [12], Al-Ogaidi et al. [13] and Cruz-Bautista et al. [10]. Organic matter content was also considered since it has been observed that an increase in it produces a soil with higher water-holding capacity and conductivity, largely as a result of its influence on soil aggregation and associated pore space distribution [34]. The proposed model is composed of the following nonlinear equations:

$$d = q^{0.2975} K_s^{3.1679} t^{0.3490} \theta_i^{0.0903} P_b^{7.1565} OM^{-2.8332}$$
(1)

$$z = q^{0.2858} K_s^{1.0710} t^{0.4786} \theta_i^{0.2771} P_b^{8.5567} OM^{-0.3984}$$
(2)

where d is the horizontal dimension of the wetting front (cm) at the soil surface, z is the vertical dimension of the wetting front (cm), q is the emitter discharge rate (l h⁻¹), K_s is the saturated hydraulic conductivity (cm h⁻¹), t is the irrigation time (h), θ_i is the initial volumetric moisture content (cm³ cm⁻³), P_b is the soil bulk density (g cm⁻³), and OM is the percent organic matter (%).

2.7. Evaluated Models

The model proposed in this research was compared with the models of Schwartzman and Zur [24], Amin and Ekhmaj [6], Malek and Peters [12], Al-Ogaidi et al. [13], and Cruz-Bautista et al. [10].

The Schwartzman and Zur [24] model is a semi-empirical model; the result of a dimensional analysis and experimental observations reported by Bresler [35] for two soil types and two emitter discharge rates. The Amin and Ekhmaj [6] model is an empirical model obtained from four data sets of experimental observations published by Taghavi et al. [36], Angelakis et al. [37], Hammami et al. [9], and Li et al. [38]. The empirical model of Malek and Peters [12] was generated with experimental field data with a single soil type, three emitter discharge rates, and a single initial moisture content. The model of Al-Ogaidi et al. [13] was obtained from five experimental data sets; they corresponded to the four sets used in the generation of the model of Amin and Ekhmaj [6] and the observations of Li et al. [39]. Cruz-Bautista et al. [10] obtained their model with experimental field data in three soil types and three emitter discharge rates, but with a small range of initial moisture values.

The mathematical expressions of the comparison models are as follows.

Schwartzman and Zur (1986) [24]:

$$d = 27.286 (V)^{0.22} (\frac{K_s}{q})^{-0.17}$$
(3)

$$z = 9.227 (V)^{0.63} (\frac{K_s}{q})^{0.45}$$
(4)

Amin and Ekhmaj (2006) [6]:

$$d = 12.544\Delta\theta^{-0.5626} V^{0.2686} q^{-0.0028} K_s^{-0.0344}$$
(5)

$$z = 6.194\Delta\theta^{-0.383} V^{0.365} q^{-0.101} K_s^{0.195}$$
(6)

Malek and Peters (2011) [12]:

$$d = q^{0.543} K_s^{0.772} t^{0.419} \Delta \theta^{-0.687} P_b^{0.305}$$
(7)

$$z = q^{0.398} K_s^{0.208} t^{0.476} \Delta \theta^{-1.253} P_b^{0.445}$$
(8)

Al-Ogaidi et al. (2015) [13]:

$$d = 40.489q^{0.2717}t^{0.2562}K_s^{-0.2435}\theta_i^{0.1122}P_b^{2.0770}S^{-0.1082}Si^{0.0852}C^{-0.1540}$$
(9)

$$z = 2.266q^{0.3249}t^{0.3902}K_s^{0.0010}\theta_i^{0.0520}P_b^{6.1919}S^{-0.0928}Si^{0.2574}C^{-0.2162}$$
(10)

Cruz-Bautista et al. (2016) [10]:

$$d = 9.985 V^{0.353} K_s^{-0.110} \theta_i^{-0.387}$$
(11)

$$z = 331.524V^{0.458}q^{-0.152}\theta_i^{0.386}\theta_r^{0.349}Si^{-0.421}$$
(12)

where d, z, q, K_s, t, θ_i , and P_b mean the same as in equations (1) and (2); V is the total volume of water applied (l); $\Delta\theta$ is the average change in water content due to irrigation (cm³ cm⁻³) which is obtained as $\Delta\theta = \theta_s/2$, where θ_s is the water content at saturation; S is the percentage of sand (%); S is the percentage of silt (%); C is the percentage of clay (%) and θ_r is the residual soil moisture content (cm³ cm⁻³).

Table 5 shows the validity ranges of the evaluated models, according to the limits of the experimental data used for their generation.

Model	Soil Texture	q (1 h ⁻¹)	Ks (cm h⁻1)	θs (cm ³ cm ⁻³)	Рь (g ст⁻³)	θi (cm ³ cm ⁻³)	θr (cm ³ cm ⁻³)	MO (%)
Schwartzman and Zur (1986) [24]	Silt and sandy loam.	4.16–20.06	0.84– 8.4	¹ N.S.	N.S.	N.S.	N.S	N.S.
Amin and Ekhmaj (2006) [6]	Silt, loam, sand, and clay loam.	0.60 -12.30	0.85– 5.80	0.45– 0.58	1.28– 1.46	0.03– 0.27	N.S.	N.S.
Malek and Peters (2011) [12]	Clay loam.	2.00-6.00	3.66	N.S.	1.48	0.22	N.S.	N.S.
Al-Ogaidi et al. (2015) [13]	Sand, silt, loam, and clay loam.	0.50–12.30	0.85– 5.80	0.42– 0.58	1.28– 1.46	0.03– 0.27	N.S.	N.S.
	Sandy loam,							
Cruz-Bautista et al. (2016) [10]	clay loam, and silt	2.00-8.00	2.05– 3.28	0.39– 0.51	1.18– 1.51	0.05– 0.11	0.04– 0.08	N.S.
Proposed model	Sandy clay loam.	1.44-4.00	2.32– 3.95	0.43– 0.47	1.23– 1.38	0.07– 0.24	0.05– 0.06	1.70– 2.80

Table 5. Validity ranges of the evaluated models.

¹N.S.: range not specified by the authors.

2.8. Evaluation of the Models

The evaluation of the predictive capabilities of the models was performed with the mean error (ME), root mean square error (RMSE), and the Nash and Sutcliffe efficiency (NSE) [40,41]:

$$ME = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i) \right]$$
(13)

RMSE =
$$\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$
 (14)

NSE =
$$1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} (O_i - \overline{O})^2}$$
 (15)

where N is the total number of data, P_i corresponds to the i-th estimated data, O_i is the i-th observed data, and \bar{O} is the mean of the observed data.

As the ME and RMSE values approach zero, the model becomes better at estimating, with the value of zero being the optimum [40]. To score the models based on the NSE values, the Ritter and Muñoz-Carpena [42] criteria were used: unsatisfactory (NSE < 0.65), acceptable ($0.65 \le NSE < 0.80$), good ($0.80 \le NSE < 0.90$), and very good (NSE > 0.90).

A sensitivity analysis of the proposed models was performed with the aim of identifying the effect of the input parameters on the width and depth of the wetting front. For this, simulations of the model responses were performed with modifications to the input parameter values of -30%, -20%, -10%, +10%, +20%, and +30%, similar to what was performed by Bolaños-Sánchez et al. [43].

3. Results

3.1. Wetting Patterns Geometry

Figures 4 and 5 show the temporal evolution of the wetting front of the irrigations of the first and second irrigation blocks, respectively. The lines labeled A, B, and C of Figure 4 represent the advance front for 12, 36, and 60 h, respectively, after the end of irrigation.



Figure 4. Geometry of the wetting front as a function of irrigation time in the first irrigation block.



Figure 5. Geometry of the wetting front as a function of irrigation time in the second irrigation block.

3.2. Model Performance

Tables 6-8 show the statistical indicators ME, RMSE, and the efficiency indices (NSE) for the width (d) and depth of the wetting front (z) of the mathematical models evaluated. Figures 6-9 show the observed and estimated behaviors of the width and depth of the wetting front of the mathematical models evaluated.

т <i>.</i> .		Statistical Indicators						
Irrigation	Model	ME (cm)		RMSI	E (cm)	NSE		
Trial	_	d	Z	d	Z	d	Z	
	Schwartzman and Zur (1986)	-14.78	22.23	17.63	25.67	0.32	-6.05	
1A	Amin and Ekhmaj (2006)	-9.14	7.84	11.17	8.07	0.73	0.30	
	Malek and Peters (2011)	-8.74	88.40	9.23	96.69	0.81	-99.08	
	Al-Ogaidi et al. (2015)	-25.04	-6.59	27.60	8.19	-0.66	0.28	
	Cruz-Bautista et al. (2016)	-3.63	7.77	4.26	8.11	0.96	0.30	
	Proposed model	7.01	-0.08	7.65	1.31	0.87	0.98	
	Schwartzman and Zur (1986)	-22.92	7.50	24.79	8.17	-0.73	-0.19	
	Amin and Ekhmaj (2006)	-19.94	3.74	21.37	4.25	-0.29	0.68	
2A	Malek and Peters (2011)	-42.86	-0.08	44.97	1.77	-4.70	0.94	
	Al-Ogaidi et al. (2015)	-28.59	-6.33	30.43	7.69	-1.61	-0.06	
	Cruz-Bautista et al. (2016)	-33.00	12.49	34.68	13.02	-2.39	-2.03	
	Proposed model	-5.40	1.46	5.69	1.99	0.91	0.93	
	Schwartzman and Zur (1986)	-9.48	1.97	12.46	2.66	0.42	0.85	
	Amin and Ekhmaj (2006)	-8.37	1.12	10.75	2.12	0.57	0.91	
3A	Malek and Peters (2011)	-30.96	-3.56	33.05	4.13	-3.11	0.64	
	Al-Ogaidi et al. (2015)	-16.38	-8.17	18.67	9.14	-0.31	-0.75	
	Cruz-Bautista et al. (2016)	-21.81	9.08	23.63	9.56	-1.10	-0.92	
	Proposed model	4.67	-1.41	5.10	2.01	0.90	0.91	
	Schwartzman and Zur (1986)	-16.65	15.48	18.77	18.32	-0.18	-4.42	
	Amin and Ekhmaj (2006)	-9.23	2.33	10.74	2.49	0.62	0.90	
4A	Malek and Peters (2011)	-28.95	11.54	30.59	12.67	-2.12	-1.59	
	Al-Ogaidi et al. (2015)	-20.16	-9.56	22.05	10.43	-0.62	-0.75	
	Cruz-Bautista et al. (2016)	-17.66	8.58	18.82	9.36	-0.18	-0.41	
	Proposed model	6.28	-1.05	6.63	1.18	0.85	0.98	

Table 6. Statistical indicators of the empirical models for the first irrigation block for the width (d) and depth of the wetting front (z).

T · · ··		Statistical Indicators						
Irrigation	Model	ME (cm)		RMSE (cm)		Ν	SE	
I riai	-	d	Z	d	Z	d	Ζ	
1B	Schwartzman and Zur (1986)	5.69	-4.94	6.09	5.29	0.53	0.04	
	Amin and Ekhmaj (2006)	5.02	-1.52	5.45	1.71	0.62	0.90	
	Malek and Peters (2011)	-9.10	11.76	9.74	13.24	-0.20	-5.01	
	Al-Ogaidi et al. (2015)	2.77	-2.21	2.99	2.42	0.89	0.80	
	Cruz-Bautista et al. (2016)	0.05	-1.94	1.16	2.11	0.98	0.85	
	Proposed model	0.86	-0.33	1.58	0.85	0.97	0.98	
3B	Schwartzman and Zur (1986)	4.44	-3.48	4.88	3.81	0.70	0.52	
	Amin and Ekhmaj (2006)	5.01	-0.98	5.42	1.15	0.63	0.96	
	Malek and Peters (2011)	-3.77	10.16	4.13	11.56	0.78	-3.45	
	Al-Ogaidi et al. (2015)	-0.55	-4.68	1.48	5.07	0.97	0.14	
	Cruz-Bautista et al. (2016)	-1.01	-0.59	1.40	1.05	0.98	0.96	
	Proposed model	6.58	1.21	7.27	1.93	0.33	0.88	
5B	Schwartzman and Zur (1986)	3.42	-3.99	4.30	4.37	0.81	0.41	
	Amin and Ekhmaj (2006)	3.77	-1.64	4.36	1.80	0.80	0.90	
	Malek and Peters (2011)	-7.16	3.16	7.92	4.00	0.34	0.51	
	Al-Ogaidi et al. (2015)	-1.94	-6.28	3.26	6.80	0.89	-0.42	
	Cruz-Bautista et al. (2016)	-3.81	0.19	4.50	1.21	0.79	0.96	
	Proposed model	-0.47	-1.00	1.53	1.48	0.98	0.93	

Table 7. Statistical indicators of the empirical models for the second irrigation block, with an emitter discharge rate of $4 l h^{-1}$, for the width (d) and depth of the wetting front (z).

Table 8. Statistical indicators of the empirical models for the second irrigation block, with an emitter discharge rate of $3 l h^{-1}$, for the width (d) and depth of the wetting front (z).

T		Statistical Indicators							
Irrigation	Model	ME (cm)		RMSI	RMSE (cm)		SE		
Irial	_	d	Z	d	Z	d	Ζ		
2B	Schwartzman and Zur (1986)	4.31	-4.61	4.63	4.97	0.70	0.15		
	Amin and Ekhmaj (2006)	4.56	-1.60	4.93	1.99	0.66	0.86		
	Malek and Peters (2011)	-11.55	2.55	12.45	2.91	-1.20	0.71		
	Al-Ogaidi et al. (2015)	3.30	-2.25	3.56	2.61	0.82	0.77		
	Cruz-Bautista et al. (2016)	-2.88	-0.82	3.12	0.98	0.86	0.97		
	Proposed model	1.15	0.50	1.61	0.76	0.96	0.98		
4B	Schwartzman and Zur (1986)	0.74	-1.61	1.14	2.15	0.98	0.76		
	Amin and Ekhmaj (2006)	2.08	0.50	2.41	0.79	0.93	0.97		
	Malek and Peters (2011)	-5.46	14.87	5.91	16.77	0.56	-13.89		

	Al-Ogaidi et al. (2015)	-3.44	-3.12	3.79	3.35	0.82	0.41
	Cruz-Bautista et al. (2016)	-2.74	0.02	3.09	0.98	0.88	0.95
	Proposed model	2.94	1.86	3.72	2.56	0.82	0.65
6B	Schwartzman and Zur (1986)	0.23	-1.27	1.43	1.68	0.98	0.86
	Amin and Ekhmaj (2006)	1.36	0.69	1.69	0.79	0.97	0.97
	Malek and Peters (2011)	-2.56	24.21	2.95	26.97	0.90	-35.64
	Al-Ogaidi et al. (2015)	-5.28	-3.94	5.91	4.29	0.60	0.07
	Cruz-Bautista et al. (2016)	-1.31	-0.60	1.64	0.76	0.97	0.97
	Proposed model	-3.89	-0.72	4.25	0.91	0.79	0.96



Figure 6. Temporal evolution of the width and depth of the wetting front of (**a**,**b**) irrigation 1A (q = 2.90 l h^{-1} and $\theta_i = 0.07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) and (**c**,**d**) irrigation 2A (q = 2.90 l h^{-1} and $\theta_i = 0.23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).



Figure 7. Temporal evolution of the width and depth of the wetting front of (**a**,**b**) irrigation 3A (q = 3.75 l h^{-1} and $\theta_i = 0.24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) and (**c**,**d**) irrigation 4A (q = 1.44 l h^{-1} and $\theta_i = 0.14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).





Figure 8. Temporal evolution of the width and depth of the wetting front of (\mathbf{a}, \mathbf{b}) irrigation 1B (q = 4.00 l h⁻¹ and $\theta_i = 0.09$ cm³ cm⁻³), (\mathbf{c}, \mathbf{d}) irrigation 3B (q = 4.00 l h⁻¹ and $\theta_i = 0.10$ cm³ cm⁻³), and (\mathbf{e}, \mathbf{f}) irrigation 5B (q = 4.00 l h⁻¹ and $\theta_i = 0.13$ cm⁻³).





Figure 9. Temporal evolution of the width and depth of the wetting front of (\mathbf{a}, \mathbf{b}) irrigation 2B (q = 3.00 l h⁻¹ and $\theta_i = 0.13$ cm⁻³), (\mathbf{c}, \mathbf{d}) irrigation 4B (q = 3.00 l h⁻¹ and $\theta_i = 0.09$ cm⁻³), and (\mathbf{e}, \mathbf{f}) irrigation 6B (q = 3.00 l h⁻¹ and $\theta_i = 0.07$ cm⁻³).

3.3. Effect of Input Parameters on Model Response

Figure 10 shows the sensitivity of the response of the proposed model to the input parameters.



Figure 10. Effect of input parameters on the response of the proposed models for (**a**) width and (**b**) depth of the wetting front.

4. Discussion

4.1. Wetting Patterns Geometry

Figures 4 and 5 show that an increase in the volume of water applied due to an increase in irrigation time or an increase in emitter discharge rate, such as in irrigations 2A and 3A (Figure 4) and irrigations 1B, 2B, and 3B (Figure 5) with similar initial moisture content, generates a greater horizontal and vertical displacement of the wetting front, similar to that obtained by Subbaiah and Mashru [2] and Ainechee et al. [8]. Consequently, it is verified that the volume of water applied influences the movement of water in the soil [10]. In all the applied discharge rates, the wetting front moved faster at the beginning of the irrigations and over time the speed of advance decreased due to the fact that the volume of soil to be wetted increased and thus the water encountered more available empty pore space in its path [9].

In the irrigations with higher discharge rates of the first block (2.90 and 3.75 l h⁻¹), the wetting front had greater horizontal than vertical displacement at the beginning of the irrigation because in those first moments the capillary forces dominated the movement of water in the soil, but as time passed the gravitational forces began to dominate causing an increase in the vertical advance and a decrease in the horizontal advance (irrigations 1A to 3A of Figure 4). In irrigation 4A of the first block (1.44 l h⁻¹) (Figure 4) and in the irrigations of the second block (Figure 5), a similar displacement was observed in all directions of the wetting front.

In irrigations 1A and 2A (Figure 4) of the first block, the effect of initial soil moisture content on the behavior of the wetting front was observed. The higher initial moisture content caused a greater vertical and horizontal advance of the wetting front than in the soil with lower initial moisture content in equal irrigation times, a much greater horizontal advance than vertical advance in the first hours of irrigation was observed. The reason for this behavior is that the higher the initial moisture, the smaller the volume of pores available in the soil [15]; therefore, less water is needed to wet the same volume of soil. Greater spreading of the wetting front in both directions may be undesirable when root zones are shallow, water is scarce, or groundwater contamination is a concern [11]; in such cases, lower volumes of water should be applied to soils with high initial moisture.

In irrigations 2A to 3A (Figure 4) of the first irrigation block, the effect of irrigating with similar initial moisture conditions and different emitter discharge rates can be noted.

Irrigation with the highest discharge rate generated a greater vertical advance, causing irrigation 3A to reach vertical dimensions similar to irrigation 2A in less time. This was mainly due to the hydraulic properties of the soil under evaluation and the increase in the discharge rate as indicated by Naglič et al. [15], who suggested that high discharge rates that do not exceed the infiltration capacity of the soil usually generate extended moisture fronts in the vertical direction since there is no ponding that favors horizontal spreading.

The comparison between irrigations 1A and 4A (Figure 4) shows the effect of variations in the emitter discharge rate and initial soil moisture on the behavior of the wetting front. By decreasing the initial moisture and increasing the emitter discharge rate (irrigation 1A) a greater horizontal displacement was generated, a smaller vertical displacement in irrigation 1A than in irrigation 4A in the first hours of irrigation was observed, and similar displacement was observed in long irrigation times. It was expected to obtain a behavior similar to that reported by Skaggs et al. [11], who indicated that increasing the emitter discharge rate generally tends to increase spreading in both directions with greater effect in the vertical direction. This apparent contradiction of the results in the vertical displacement is explained because in irrigation 1A the initial moisture was lower than in irrigation 4A; this condition favored the predominance of capillary forces over gravitational ones in the initial stages, but after time these forces became balanced, resulting in a similar displacement in both directions.

In the first irrigation block, gravitational and capillary forces continued to act significantly 12 h after suspending the application of water in those irrigations where the initial soil moisture was close to field capacity since the wetting front grew horizontally and vertically. After suspending irrigation for 36 and 72 h there was no variation in the wetting front, as can be seen in the red lines (Figure 4).

As in the first irrigation block, the increase in discharge rate favored vertical more than horizontal spreading in the soil with a lower amount of OM (1.7%) in the second irrigation block (irrigation 1B and 3B in Figure 5). More spherical wetting patterns occurred in the soils with a higher amount of OM in the second irrigation block (irrigations 4B, 5B, and 6B in Figure 5) than in the irrigations of the first and second blocks where the OM content is lower.

The increase in the amount of OM favored a homogeneous advance of the wetting front in all directions because it led to an increase in the proportion of macro-aggregates and porosity in the soil and a redistribution of the porous space [44], causing a delay in vertical water movement as observed by Iqbal et al. [16] in soils with high water-holding capacities. Its effects are observed in a decrease in bulk density and an increase in saturated hydraulic conductivity and moisture content at soil saturation (Tables 1 and 2). The increase in moisture at saturation did not generate an increase in the amount of usable water for the plants, but it caused a greater water-holding capacity [45], which induced similar displacements in the horizontal and vertical directions of the wetting front.

4.2. Model Performance

The proposed model showed the best performance for estimating the vertical and horizontal dimensions of the wetting front since most of the irrigations resulted in the lowest values of the ME and RMSE statistical indicators, and the highest values close to unity of the NSE index (Tables 6 to 8). The ME values for *d* and *z*, from the first and second irrigation blocks, ranged from -5.40 to 7.01 cm and from -1.41 to 1.46 cm, and from -3.89 to 6.58 cm and from -1.00 to 1.86 cm, respectively. The RMSE values were between 5.10 and 7.65 cm for *d* and between 1.18 and 2.01 cm for *z* in the irrigations of the first block, and between 1.53 and 7.27 cm for *d* and between 0.76 and 2.56 cm for *z* in the irrigations of the second block. According to the NSE values and the performance criteria of Ritter and Muñoz-Carpena [42], the model was acceptable to very good in the estimation of *d* and good to very good in the estimation of *z* in both irrigation blocks: from 0.85 to 0.91 for *d* and from 0.91 to 0.98 for *z* in the first block, and from 0.79 to 0.98 for *d* and from 0.88 to 0.98 for *z* in the second block.

Some of the models evaluated were better than the proposed one in some of the irrigations, but only in one of the two directions of the wetting front and in the other direction their estimates were very unfavorable. In some cases, other models performed well in one of the irrigation blocks without outperforming the proposed model, and poorly in the other. These partial favorable results limit their applicability in the various irrigation situations. For example, the statistical indicators obtained with the Cruz-Bautista et al. [10] model in the second irrigation block indicate a good estimation of the depth and width of the wetting front, but a poor representation in the first irrigation block.

According to the irrigation conditions considered (Tables 3 and 4) and the validity conditions of the models (Table 5), a better prediction would be expected in the models of Al-Ogaidi et al. [13] and Cruz-Bautista et al. [10], but this was not the case since in some irrigations of the first block the models of Schwartzman and Zur [24], Amin and Ekhmaj [6], and Malek and Peters [12] were better even though they did not consider all the parameters of the proposed model or their values were unique or of reduced ranges.

Figures 6 to 9 show the better predictive capacity of the proposed model over the other models. The proposed model, in general, tends to slightly overestimate the horizontal advance of the wetting front in both irrigation blocks, showing a parallelism with the behavior observed during the entire irrigation time. This model tends to slightly underestimate the vertical advance of the wetting front at the end of the irrigations, converging with the behavior observed a little before the halfway point of their duration. The differences between the observed and estimated values in both directions of the advance front are small compared with those of the other models.

The incorporation of soil organic matter content as a variable in the proposed model contributed to improving its estimates. Amin and Ekhmaj [6] and Malek and Peters [12] did not consider organic matter in their models because they considered that it is integrated into the bulk density and hydraulic conductivity at soil saturation; however, in this study the need for its integration was observed since it modifies the porosity and colloidal structure of the soil and consequently its capacity for capillary movement [34,44].

Kandelous and Simunek [14] stated that initial soil water content is an important requirement to properly estimate the behavior of the wetting front with empirical models in drip irrigation. Indeed, a better performance was observed for models that considered initial moisture than those that did not. As an example of this, the deficiency of the estimates of the Schwartzman and Zur [24] model stands out in irrigations 1A and 2A of the first block (Figure 6); where, for the same volume of applied water, the results were the same despite the fact that the initial water contents were very different (one close to PMP and the other to FC).

4.3. Effect of Input Parameters on the Model Response

The sensitivity analysis of the proposed mathematical model shows that soil characteristics were more determinant than initial moisture (Figure 10), as observed by Li et al. [46] and Fan et al. [47]. The resulting values of the input parameters used in the analysis guarantee the range of values contemplated in this study since the reference values on which the variations were made were $2.90 \text{ l} \text{ h}^{-1}$, $3.24 \text{ cm} \text{ h}^{-1}$, $0.14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, 1.31 g cm^{-3} , 2.4%, and 3.17 h, for discharge rate (q), saturated hydraulic conductivity (K_s), initial moisture content (θ_i), bulk density (P_b), percent organic matter (OM), and irrigation time (t), respectively. P_b had a similar impact on the radius and depth of the wetting front, while OM and K_s had a greater impact on radius than on depth. P_b had a direct effect (as its value increases, its effect on the magnitude of the wetting front increases) and K_s and OM had an inverse effect (as its value increases, its effect on the magnitude of the wetting front decreases) in both directions of the wetting front. The q, θ_i , and t had a direct and smaller effect than the physical properties of the soils on the displacements in both directions of the wetting front; q and t had practically identical effects on the radius, and q and θ_i on the depth. The θ_i has the least effect in both

directions of the wetting front and attenuates more in depth, so Fan et al. [47] suggested removing it from the modeling; however, in this study the results showed the need for its inclusion as it considerably improved the accuracy of the estimates with respect to those that do not include it. The better predictive capacity of the proposed model to estimate the dimensions of the wetting front was due to the consideration of the parameters involved in water movement, the range of parameter values, and the care taken in the execution of the methodology.

5. Conclusions

A nonlinear empirical mathematical model was generated to estimate the horizontal (width) and vertical (depth) magnitude of the advance front of the wetting front of a sandy clay loam-textured soil as a function of some soil physical characteristics (saturated hydraulic conductivity (K_s), bulk density (P_b), and organic matter content (OM)), initial moisture content (θ_i), and irrigation operating characteristics (emitter discharge rate q and irrigation time t).

The proposed empirical model had better approximations to the observed values than the empirical models of Schwartzman and Zur [24], Amin and Ekhmaj [6], Malek and Peters [12], Al-Ogaidi et al. [13], and Cruz-Bautista et al. [10]. Its average performance was good (NSE = 0.84) and very good (0.92) to estimate the width and depth of the wetting front, respectively. The average RMSE values for width and depth were 4.50 cm and 1.50 cm, respectively.

As the initial soil moisture increased, the irrigations generated wetting fronts of greater vertical and horizontal magnitude. Increasing the emitter discharge rate had a greater impact on the vertical than on the horizontal advance for the soils studied. Although there is a strong relationship between saturated hydraulic conductivity, bulk density, and soil organic matter content, it was better to consider all three parameters instead of just one or two of them in the predictive model.

The effect of soil characteristics predominates the effect of applied water volume and initial soil moisture content in predicting the horizontal and vertical advance of the wetted front.

The amount of OM in the soil influenced the geometry of the wetting front, favoring a spherical shape, because there is an increase in the proportion of macro-aggregates in the soil and a redistribution of the porous space.

Author Contributions: Conceptualization, J.V.P.-H.; methodology, I.C.-M., J.V.P.-H. and D.C.-M.; software, I.C.-M. and A.M.-R.; validation, I.C.-M., J.V.P.-H. and A.M.-R.; formal analysis, I.C.-M., J.V.P.-H. and D.C.-M.; investigation, I.C.-M., J.V.P.-H., D.C.-A. and F.P.-R.; resources, J.V.P.-H., F.P.-R., and D.C.-A.; writing—original draft preparation, I.C.-M., J.V.P.-H. and D.C.-A.; writing—review and editing, I.C.-M., J.V.P.-H., A.M.-R., F.P.-R., D.C.-A. and D.C.-M.; supervision, I.C.-M. and J.V.P.-H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Chapingo Autonomous University (UACh).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

Acknowledgments: UACh's DGIP is thanked for the economic support provided for the acquisition of the soil container. Soil Physics Laboratory of the Soil Department (University of Chapingo) is thanked for the support provided in soil determinations. The first author thanks to the National Council for Science and Technology (CONACYT) for the scholarship received.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- 1. Skaggs, T.H.; Trout, T.J.; Šimůnek, J.; Shouse, P.J. Comparison of HYDRUS-2D Simulations of Drip Irrigation with Experimental Observations. J. Irrig. Drain. Eng. 2004, 130, 304–310. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(304).
- Subbauah, R.; Mashru, H.H. Modeling for predicting soil wetting radius under point source surface trickle irrigation. Agric. Eng. Int. CIGR J. 2013, 15, 1–10.
- 3. Subbaiah, R. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. Irrig. Sci. 2013, 31, 225–258. https://doi.org/10.1007/s00271-011-0309-x.
- 4. C. R. Camp. Subsurface drip irrigation: A review. Trans. ASAE 1998, 41, 1353–1367. https://doi.org/10.13031/2013.17309.
- 5. Ayars, J.E.; Fulton, A.; Taylor, B. Subsurface drip irrigation in California Here to stay? Agric. Water Manag. 2015, 157, 39–47. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.001.
- 6. Amin, M.S.; Ekhmaj, A.I. DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. In Proceedings of the 7th International Micro Irrigation Congress, Kuala Lumpur, Malaysia, 13–15 September 2006; Volume 1016.
- 7. Waller, P.; Yitayew, M. Introduction. In Irrigation and Drainage Engineering; Waller, P., Yitayew, M., Eds.; Springer International Publishing Cham: Manhattan, NY, USA, 2016; pp. 1–18, ISBN 978-3-319-05699-9.
- 8. Ainechee, G.; Boroomand-Nasab, S.; Behzad, M. Simulation of soil wetting pattern under point source trickle irrigation. J. Appl. Sci. 2009, 9, 1170–1174.
- 9. Moncef, H.; Hedi, D.; Jelloul, B.; Mohamed, M. Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: Theory and numerical aspect. Irrig. Drain. 2002, 51, 347–360. https://doi.org/10.1002/ird.60.
- Cruz-Bautista, F.; Zermeño-González, A.; Álvarez-Reyna, V.; Cano-Ríos, P.; Rivera-González, M.; Siller-González, M. Validación de un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo con riego por goteo. Tecnol. Cienc. Agua 2016, 7, 45–55.
- 11. Skaggs, T.H.; Trout, T.J.; Rothfuss, Y. Drip Irrigation Water Distribution Patterns: Effects of Emitter Rate, Pulsing, and Antecedent Water. Soil Sci. Soc. Am. J. 2010, 74, 1886–1896. https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0341.
- Malek, K.; Peters, R.T. Wetting Pattern Models for Drip Irrigation: New Empirical Model. J. Irrig. Drain. Eng. 2011, 137, 530– 536. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000320.
- 13. Al-Ogaidi, A.A.M.; Wayayok, A.; Kamal, M.R.; Abdullah, A.F. A modified empirical model for estimating the wetted zone dimensions under drip irrigation. J. Teknol. 2015, *76*, 69–73. https://doi.org/10.11113/jt.v76.5954.
- 14. Kandelous, M.M.; Šimůnek, J. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. Irrig. Sci. 2010, 28, 435–444. https://doi.org/10.1007/s00271-009-0205-9.
- 15. Naglič, B.; Kechavarzi, C.; Coulon, F.; Pintar, M. Numerical Investigation of the Influence of Texture, Surface Drip Emitter Discharge Rate and Initial Soil Moisture Condition on Wetting Pattern Size. Irrig. Sci. 2014, 32, 421–436. https://doi.org/10.1007/s00271-014-0439-z.
- 16. Iqbal, M.; Ghumman, A.R.; Hashmi, H.N. Study of wetting pattern under drip-emitter using sand box model and empirical equations. Pak. J. Agric. Sci. 2017, 54, 699–709. https://doi.org/10.21162/pakjas/17.6086.
- 17. Moncef, H.; Khemaies, Z. Optimizing Emitters' Density and Water Supplies in Trickle Irrigation Systems. Am. J. Water Sci. Eng. 2019, 5, 16. https://doi.org/10.11648/j.ajwse.20190501.13.
- 18. Zur, B. Wetted Soil Volume as a Design Objective in Trickle Irrigation. Irrig. Sci. 1996, 16, 101–105. https://doi.org/10.1007/BF02215617.
- 19. Ramírez de Cartagena Bisbe, F.; Sáinz Sánchez, M.A. Modelo de Distribución de Agua En Suelo Regado Por Goteo. Ing. Agua 1997, 4, 57–70. https://doi.org/10.4995/ia.1997.2716.
- 20. Dasberg, S.; Or, D. Practical Applications of Drip Irrigation. In Drip Irrigation; Dasberg, S., Or, D., Eds.; Applied Agriculture; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1999; pp 125–138. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03963-2_6.
- 21. Moncef, H.; Khemaies, Z. An Analytical Approach to Predict the Moistened Bulb Volume beneath a Surface Point Source. Agric. Water Manag. 2016, 166, 123–129. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.020.
- 22. Chu, S.-T. Green-Ampt Analysis of Wetting Patterns for Surface Emitters. J. Irrig. Drain. Eng. 1994, 120, 414–421. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1994)120:2(414).
- 23. ZhiGang, L.; QinChao, X. Wetting Patterns Estimation in Cultivation Substrates under Drip Irrigation. Desalin. Water Treat. 2018, 112, 319–324.
- 24. Schwartzman, M.; Zur, B. Emitter Spacing and Geometry of Wetted Soil Volume. J. Irrig. Drain. Eng. 1986, 112, 242–253. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:3(242).
- 25. Nafchi, R.F.; Mosavi, F.; Parvanak, K. Experimental study of shape and volume of wetted soil in trickle irrigation method. Afr. J. Agric. Res. 2011, *6*, 458–466. https://doi.org/10.5897/AJAR10.727.

- 26. Al-Ogaidi, A.A.M.; Wayayok, A.; Rowshon, M.K.; Abdullah, A.F. Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model. Agric. Water Manag. 2016, 176, 203–213. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.06.002.
- 27. Nagaraja, M.S.; Bhardwaj, A.K.; Reddy, G.V.P.; Srinivasamurthy, C.A.; Kumar, S. Estimations of soil fertility in physically degraded agricultural soils through selective accounting of fine earth and gravel fractions. Solid Earth 2016, 7, 897–903. https://doi.org/10.5194/se-7-897-2016.
- 28. Kirkby, C.A.; Kirkegaard, J.A.; Richardson, A.E.; Wilson, B.; Kirkby, C.A.; Kirkegaard, J.A.; Richardson, A.E.; Wilson, B. Gravelassociated organic material is important to quantify soil carbon and nitrogen stocks to depth in an agricultural cropping soil. Soil Res. 2021, 60, 224–233. https://doi.org/10.1071/SR21140.
- 29. USDA, Soil Survey Staff. Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys; Agric. Handbook, 436; US Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 1975.
- 30. Schaap, M.G.; Leij, F.J.; van Genuchten, M.Th. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. J. Hydrol. 2001, 251, 163–176. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8.
- 31. van Genuchten, M.Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 1980, 44, 892–898. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- 32. Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 1976, 12, 513–522. https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513.
- 33. Starr, J.L.; Paltineanu, I.C. Methods for measurement of soil water content: Capacitance devices. Methods Soil Anal. Part 2002, 4, 114621.
- 34. Saxton, K.E.; Rawls, W.J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Soil Sci. Soc. Am. J. 2006, 70, 1569–1578. https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117.
- 35. Bresler, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. Irrig. Sci. 1978, 1, 3–17. https://doi.org/10.1007/BF00269003.
- 36. Taghavi, S.A.; Mariño, M.A.; Rolston, D.E. Infiltration from Trickle Irrigation Source. J. Irrig. Drain. Eng. 1984, 110, 331–341. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1984)110:4(331).
- 37. Angelakis, A.N.; Kadir, T.N.; Rolston, D.E. Time-dependent soil-water distribution under a circular trickle source. Water Resour. Manag. 1993, 7, 225–235. https://doi.org/10.1007/BF01675305.
- 38. Li, J.; Zhang, J.; Ren, L. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. Irrig. Sci. 2003, 22, 19–30. https://doi.org/10.1007/s00271-003-0064-8.
- 39. Li, J.; Zhang, J.; Rao, M. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. Agric. Water Manag. 2004, 67, 89–104. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.02.002.
- 40. Willmott, C.J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 1982, 63, 1309–1313. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2.
- 41. Willmott, C.J.; Robeson, S.M.; Matsuura, K. A refined index of model performance. Int. J. Climatol. 2012, 32, 2088–2094. https://doi.org/10.1002/joc.2419.
- 42. Ritter, A.; Muñoz-Carpena, R. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. J. Hydrol. 2013, 480, 33–45. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004.
- Bolaños-Sánchez, C.; Prado-Hernández, J.V.; Silván-Cárdenas, J.L.; Vázquez-Peña, M.A.; Madrigal-Gómez, J.M.; Martínez-Ruíz, A. Estimating Rainfall Interception of Pinus hartwegii and Abies religiosa Using Analytical Models and Point Cloud. Forests 2021, 12, 866. https://doi.org/10.3390/f12070866.
- 44. Rivera, F.S.; Chaparro, V.O.; Solorio, C.O.; de León González, F. Cambios en las propiedades físicas de dos suelos de una región semiárida debidos al uso agrícola. Agrociencia 2000, 34, 379–386.
- 45. Minasny, B.; McBratney, A.B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. Eur. J. Soil Sci. 2018, 69, 39–47. https://doi.org/10.1111/ejss.12475.
- 46. Li, Y.-B.; Fan, Y.-W.; Liu, Y.; Ma, X.-Y. Influencing Factors and Simplified Model of Film Hole Irrigation. Water 2017, 9, 543. https://doi.org/10.3390/w9070543.
- 47. Fan, Y.; Shao, X.; Gong, J.; Wang, Y. An empirical model for estimating soil wetting pattern dimensions during film hole irrigation. Arch. Agron. Soil Sci. 2020, 66, 1765–1779. https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1694147.

7 ANEXOS



DIRECCIÓN DIVISIONAL DE PATENTES. SUBDIRECCIÓN DIVISIONAL DE PROCESAMIENTO ADMINISTRATIVO DE PATENTES.

COORDINACIÓN DEPARTAMENTAL DE RECEPCIÓN Y CONTROL DE DOCUMENTOS.

ACUSE DE RECIBO DE LA SOLICITUD DE:

Patente

SOLICITANTE(S)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

REPRESENTANTE LEGAL:

Juan Luis MORENO ARELLANO

DOCUMENTOS DE LA SOLICITUD:



MX/a/2022/012646

MX/E/2022/073525

EXPEDIENTE: MX/a/2022/012646

FOLIO DE RECEPCIÓN: MX/E/2022/073525

IDENTIFICADOR DE LA SOLICITUD: 126347

LUGAR, FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN

DE LA SOLICITUD: CIUDAD DE MÉXICO 07/10/2022 02:06:19

DOCUMENTO	NOMBRE ARCHIVO	TAMAÑO	HOJA(S)
SOLICITUD	Solicitud_000126347_07_10_2022.pdf	432.86 KB	5
COMPROBANTE DE PAGO	Pago.pdf	22.94 KB	1
HOJA DE DESCUENTO	HOJA DE DESCUENTO.pdf	25.25 KB	1
CONSTANCIA RGP	RGP-DDAJ-001958-2020 JLMA.pdf	228.69 KB	2
DOCUMENTO COMPROBATORIO DE DIVULGACION PREVIA	Doc. Divulgación Previa.pdf	1871.19 KB	5
MEMORIA_TECNICA	MEMORIA TÉCNICA-DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO.pdf	286.72 KB	61
DIBUJOS	FIGURAS-DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO.pdf	1212.71 KB	14
OTROS	Cesión de derechos de invención firmado.pdf	1103.12 KB	3

TOTAL DE HOJAS: 92 (No se incluyen hoja(s) del acuse)

Los documentos adjuntos están sujetos al estudio correspondiente que el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial realice de conformidad con la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial o la Ley de la Propiedad Industrial, según sea el caso, considerando la fecha de recepción de su solicitud; así como de conformidad al Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial, aplicable a ambas legislaciones en términos de lo dispuesto por los artículos Transitorios Cuarto y Noveno del Decreto por el que se expide la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, publicado el día 01 de julio de 2020 en el diario oficial de la federación

La presente solicitud se recibe en términos del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; por lo tanto, previo a su presentación, el usuario aceptó lo siguiente:

I.- Que el trámite se efectúe, desde su inicio hasta su conclusión, a través de medios de comunicación electrónica;

II.- Bajo protesta de decir verdad, que revisó en la vista previa la información capturada y los anexos a la solicitud y que éstos son correctos; así mismo que, una vez concluido el proceso, no podría editar o variar la información o sus anexos;

III.- Bajo protesta de decir verdad, indicó que la información capturada es cierta;

IV.- Consultar su tablero, al menos, los días quince y último de cada mes, o bien, el día hábil siguiente si alguno de éstos fuere inhábil y que, en caso de no hacerlo, la notificación se tendria por hecha el día hábil siguiente a los días quince y último de cada mes, y

V.- Dar aviso por escrito, a través del correo electrónico <u>buzon@impi.gob.mx</u>, a la Dirección Divisional de Patentes, dentro de los tres días hábiles siguientes a aquel en que se vea imposibilitado, por causas imputables al instituto, a consultar el tablero o abrir los archivos depositados en el mismo, en los días señalados en la fracción IV anterior.

A efecto de que los documentos presentados a través del Sistema de Patentes en Linea, produzcan los mismos efectos que los documentos firmados autógrafamente y tengan el mismo valor probatorio, manifesto bajo protesta de decir verdad, que los documentos son copia integra e inatterada del documento impreso; que se encuentren digitalizados en formato PDF (Portable Document Format), y que los remitió de forma legible.

> Arenal #550, Pueblo Santa María Tepepan, Xochimilco, 16020, Ciudad de México. (55) 53340700 - www.gob.mx/impi

Figura 1. Primera hoja de la solicitud de registro de Patente.





MX/E/2022/073525

MX/a/2022/012646

Asimismo, desde su registro en el Portal de Acceso a Servicios Electrónicos, manifestó reconocer como propia la CURP, la cual no podrá Asimismo, desde su registro en el Portal de Acceso a Servicios Electrónicos, manifesto reconocer como propia la CURP, la cual no podrá ser sustituída con posterioridad; reconoció como propia y vidida la dirección de correo electrónico proporcionada y a ceptó que en ella se le envie cualquier comunicación relacionada con la cuenta; aceptó que el uso de la contraseña queda bajo su exclusiva responsabilidad y que deberá notificar oportunamente al instituto, cualquier situación que pudiera implicar un uso indebido; reconoció como propia, veraz y auténtica la información que envie a través del PASE o de los servicios electrónicos del Instituto, ya sea haciendo uso de su CURP y contraseña o, en su caso, su e-firma; aceptó que el uso de su CURP y contraseña o, en su caso, e-firma, por persona distinta quedará bajo su exclusiva responsabilidad y acepta como propia la información que de ésta envie o descargue a través del PASE o de los servicios electrónicos del Instituto; asumió cualquier tipo de responsabilidad derivada del mal uso que hagan de su CURP y contraseña o, en su caso, su e-firma; y reconció que el simple uso de los servicios electrónicos del Instituto; aceptación más amplia de las condiciones señaladas en el artículo 11 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto; aceptación del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

El presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada por el servidor público competente El presente documento electrónico na sido tirmado mediante el uso de la tirma electrónica avanzada por el servidor publico competente, amparada por un certificado digital vigente a la fecha de su elaboración, y es válido de conformidad con lo dispuesto en los artículos 7 y 9 fracción I de la Ley de Firma Electrónica Avanzada y artículo 12 de su Reglamento. El presente documento electrónico, su integridad y autoría, se podrá comprobar en www.gob.mx/impi. Asimismo, se emitó conforme lo previsto por los artículos 1º fracción III; 2º fracción VI; 37, 38 y 39 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de Servicios Electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.



JAUIER ARIZMENDI SHOID0001000000514523498|SERVICIO DE ADMINISTRACION TRIBUTARIA|126347| MX/a2022/012646|MXE/2022/073525507/10/2022 14:06:19|Documento_Firma_Electronica.pdf1|9063.94 KB| J2X/a/SysUVASCNMFq+ip1W94Rc=

TawgRMikT30LC5/hROlQ5Eyl4KL7XLR92f6Plt5FkoJoC++A2XV+L4fRK3uXOEjx2r6ukn5N4onFVMgS +D1Xo9XdYpKF5f9b5BHGKKH6RcCUfOKo54lSKgjK5uwQKCBOTmu/4qhb4n2XIPoLo +c6gxCK1EQYT17856F1K0fb2JIW4hFMXRUjeLPnTZLufPxCWhATahF050DVQIehSa2VowUk2o6SZKsr7QSZjrUM53dMuB N7zSsYCbXHFRqwsqidJPa+MWYWX180 +Kji5abEW9NIF2qmMbZGi4G/SwmPWrR2ZwhKxoORqzpjWJKIJM7PO6MJCPAz6bz0gYDA==

Para verificar la autenticidad del presente documento, podrá ingresar a la página electrónica https://validadocumento.impl.gob.mx/, escaneando el código bidimensional QR que aparece a un costado de la e-firma del Servidor Público que signó el mismo, indicando, en su caso, el tipo de documento que pretende validar (solcituda, acuse, oficio o pormoción); lo anterior, con fundamento en lo dispuesto por los artículos 1º fracción III; 2º fracción VI: 37, 38 y 39 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de Servicios Electrónicos del instituto Mexicano de la Propiedad Industriai; en caso de no contar con lector QR o en su defecto no pueda ser leido por su dispositivo, digitar en la página antes referida el siguiente código: qHRseDL2ijyYO9t4xdonvqJC/Y=

Arenal #550, Pueblo Santa María Tepepan, Xochimilco, 16020, Ciudad de México. (55) 53340700 - www.gob.mx/impi

Figura 2. Segunda hoja de la solicitud de registro de Patente.

gob mx

MX/a/2022/012646

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

REPRESENTACIÓN DE LA SOLICITUD DE REGISTRO DE PATENTE ENVIADA A TRAVÉS DEL PORTAL DE ACCESO A SERVICIOS ELECTRÓNICOS (PASE).

Homoclave del formato

Folio: MX/E/2022/073525

 Fecha de solicitud del trámite

 07
 10
 2022

Folio

Datos generales de la solicitud

Normal

Solicitud de Patente

O Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad

Solicitud de Registro de Diseño Industrial
 Especifique cual:
 Modelo Industrial
 Dibujo Industrial

Expediente: MX/a/2022/012646 ID Solicitud: 126347 Fecha: 07/10/2022 02:06:19

Personas físicas Personas morales CURP: RFC: UAC771230988 Nombre(s): Denominación o razón social: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO Primer apellido: Segundo apellido: Nacionalidad: Nacionalidad: MÉXICO Teléfono (Lada, Número, Extensión): 5959521500, Ext. 1787 Teléfono (Lada, Número, Extensión): Correo electrónico: Correo electrónico: dgip.direccion@chapingo.mx O Continúa en anexo Continúa en anexo

Datos del (de los) solicitante(s)



Figura 3. Tercera hoja de la solicitud de registro de Patente.

MX/a/2022/012646

gob mx

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

Datos del (de los) apoderado(s)					
CURP: MOAJ741029HDFRRN03	RGP: RGP-DDAJ-001958/2020				
Nombre(s): Juan Luis	Personas autorizadas para oír/recibir notificaciones:				
Primer apellido: MORENO					
Segundo apellido: ARELLANO					
Nacionalidad: MÉXICO					
Teléfono (Lada, Número, Extensión): 5959518890	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				
Correo electrónico: jmorenoa@chapingo.mx	O Continúa en anexo				

Domicilio del (de los) apoderado(s)					
Código postal: 56230					
Calle: IRRIGACIÓN					
Número exterior: 28	Número interior:				
Colonia: COLONIA DE PROFESORES, CHAPINGO					
Municipio o delegación: TEXCOCO	Localidad:				
Estado o entidad federativa: ESTADO DE MÉXICO	Entre calles:				
País: MÉXICO					

Datos de la Solicitud
Denominación o título de la invención: DISPOSITIVO Y MÉTODO PARA MEDIR CON VISIÓN ARTIFICIAL LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO.
Fecha divulgación previa: 07/10/2021

	Divisional de la solicitud					
Fecha presentación:						
Número:						
Figura jurídica:						

Prioridad Reclamada							
País:	Fecha de Presentación:	Número de Serie:	Codigo DAS				



Figura 4. Quinta hoja de la solicitud de registro de Patente.

RÁMITE EN LÍNEA: 536185 10059550011 RFC: IM-P33211-M1 CONCEPTO CANTON PREGMEN FEGAL/000 PERSONAS MORALES CON TRES NULCEATRM Ia Por la presentación de una solicitud de patente ysus anexos de hasta 30 hojas 1 \$44,550.00 \$2,275.00 \$2,275.00 \$384,00 Ia Por la presentación de una solicitud de patente 1 \$44,550.00 \$46,650.00 \$2,275.00 \$384,00 Ia Por la presentación de una solicitud de patente 1 \$41,456.35 \$46,650.00 \$2,275.00 \$384,00 \$32,275.00 \$384,00 \$384,00 \$32,275.00 \$384,00 \$32,275.00 \$384,00 \$32,275.00 \$384,00 \$32,275.00 \$384,00 \$32,275.00 \$384,00 \$32,275.00 \$384,00 \$32,275.00 \$384,00 \$32,275.00 \$384,00 \$32,200 \$394,00 \$394,00 \$34,433,50 \$32,200 \$344,00 \$34,433,50 \$1,433,50 \$1,433,50 \$1,433,50 \$1,433,50 \$1,433,50 \$1,433,50 \$1,433,50 \$1,433,50 \$1,433,50 \$1,433,50 \$1,433,50 \$1,433,50 \$1,433,50 \$1,433,50	10059550011		PE	RIFÉRICO SU	INSTITUTO M DE LA PR INI IR 3106, COL .	EXICANO OPIEDAD DUSTRIAL JARDINES DEL 1900. CIUDAD	PEDREGA DE MÉXIC
CONCEPTO CARTEND UM PREED UM MEGREE TARIFA DESOURND TCRAL TARIFA IVA a Por la presentación de una solicitud de patente ysus anexos de hasta 30 hojas id 1 \$4,550.00 \$2,275.00 \$22,75.00 \$3284.00 id Por publicación anticipada de la solicitud de patente laBIS 1 \$4,550.00 \$4,650.00 \$2,275.00 \$22,87.00 \$3284.00 JaBIS Por el concepto a que se refiere el arfoculo 1a, por cada hoja adicional 47 \$61.00 \$2,287.00 \$1,433.50 \$1,433.50 \$1,433.50 \$2,283.00 \$1,433.50 \$1,433.50 \$2,283.00 \$1,433.50 \$1,433.50 \$2,283.00 \$1,433.50	TRÁMITE EN LÍNEA: 536185 10059550011		REGIMEN FIS	CAL(603) PERSO	ONAS MORALES	RFC: IMP-	931211-NE
Ia Por la presentación de una solicitud de patente ysus anexos de hasta 30 hojas Id Por publicación anticipada de la solicitud de patente IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional IABIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada ho	CONCEPTO	CANTIDAD U.M	PRECIO	IMPORTE TARIFA	DESCUENTO	TOTAL TARIFA	IVA
1 \$1,185.35 \$1,185.35 \$2692.68 \$592.67 \$94.8 1 aBIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1 a, por cada hoja adicional 47 \$61.00 \$2,867.00 \$1,433.50 \$1,433.50 \$229.3	La Por la presentación de una solicitud de patente y sus anexos de hasta 30 hojas	1	\$4,550.00	\$4,550.00	\$2,275.00	\$2,275.00	\$364.0
aBIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional 47 \$61.00 \$2,867.00 \$1,433.50 \$1,433.50 \$229.3 	1d Por publicación anticipada de la solicitud de patente		\$1,185.35	\$1,185.35	\$592.68	\$592.67	\$94.8
	1aBIS Por el concepto a que se refiere el artículo 1a, por cada hoja adicional		\$61.00	\$2,867.00	\$1,433.50	\$1,433.50	\$229.3
							20
	PUE - PAGO EN UNA SOLA EXHIBICIÓN APLICA DESCUENTO - UNIVERSIDAD ANOTACIONES : Solicitud de Patente denominada DISPOSITIVO Y MÉTODO PARAMEDIR CON VISIÓN ARTIFIC UMEDO EN REGO POR GOTEO. Profesor Investigador Dr. Jorge Mator Pado Hemández. CUATRO MIL NOVECIENTOS OCHENTA Y NUEVE PESOS 36/100 MN	IAL LA GEON	METRÍA DEL B	ULBO	AC TUALIZAD R BCAR TOTAL A PA	TAL NA SDN Gos Gar	\$4,301.17 \$638.19 \$0.00 \$0.00 \$4,989.36

* Este documento no es un comprobante fiscal.
* Su factura estará generada dentro de los tres días hábiles posteriores a su pago.
* El comprobante de pago FEPS sin factura es válido para presentar el trámite que ampara ante el IMPI.
* Sisu RFC no coincide con el registrado ante el SAT, la factura se emitirá con un RFC genérico.

ORIGINAL CLIENTE / EXPEDIENTE DEL SOLICITANTE

Figura 5. Octava hoja de la solicitud de registro de Patente.



Ciudad de México, 07/10/2022

Solicitud de: PATENTE

Bajo Protesta de decir verdad declaro, con respecto al beneficio señalado en la Cuarta Disposición General de la Tarifa por los servicios que presta el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, y con fundamento en la fracción III de dicha Disposición, que me encuentro en el supuesto abajo señalado, por lo que solicito el 50% de descuento de la Tarifa establecida para el Artículo 1a, 1aBIS, 1d.

Hago la presente declaración en cumplimiento de dicha disposición, según el Acuerdo por el que se da a conocer la Tarifa por los servicios que presta el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, publicado en el Diario Oficial de la Federación con fecha 23 de agosto de 1995.

Micro y Pequeña Empresa	()	
Instituto de Investigación Científica y Tecnológica del Sector Público	()	
Universidad	()	X)	
Diseñador/Inventor Independiente	()	

ATENTAMENTE:

Nombre: Juan Luis MORENO ARELLANO por poder de UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Figura 6. Novena hoja de la solicitud de registro de Patente.



DIRECCION DIVISIONAL DE ASUNTOS JURIDICOS SUBDIRECCION DIVISIONAL DE ASUNTOS JURIDICOS

EXPEDIENTE: RCP-DDAJ-001958/2020 OFICIO: JU/S/2020/006007 ASUNTO: Constancia REF.: Escrito recibido el 17/11/2020, bajo el folio 2043/2020

Ciudad de México a 26/11/2020

JUAN LUIS MORENO ARELLANO CALLE IRRIGACIÓN NUMERO 28 COLONIA COLONIA DE PROFESORES MUNICIPIO TEXCOCO ESTADO DE MEXICO C.P. 56230 P R E S E N T E

En contestación a su escrito de referencia, se le comunica que para los fines declarativos de registro, se expide la presente constancia de inscripción en el Registro General de Poderes de este Instituto, del poder conferido al C. JUAN LUIS MORENO ARELLANO, por la persona Moral, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO; quedando registrado con el número RGP-DDAJ-001958/2020 a partir del 17/11/2020.

El ejercicio de las facultades que constan en el poder que se registra se encuentra limitado y sujeto a las formalidades y disposiciones de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, que para cada trámite establece.

En ese orden de ideas, se establece que el poder inscrito tiene una vigencia explicita, desde la fecha de otorgamiento 20 de diciembre de 2019 hasta el 31 de diciembre de 2023, tal y como lo señala el instrumento notarial 47751 registrado.

Asimismo, se hace de su conocimiento que este Organismo al inscribir el documento antes indicado, deja a salvo los derechos de terceros para impugnar su registro y, en su caso, proceder a la cancelación de la inscripción.

El presente se signa además, con fundamento en el artículo 9 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial y su Capítulo III; ; 1°, 2°, 3° fracción V, inciso i), subíndice i), 4°, 5°, 11 fracción II y su último párrafo, así como 20 fracción V del Reglamento del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, 1°, 2°, 3°, 4°, 5° fracción V, inciso i), subínciso i), único guion), 15 fracción II y su último párrafo, 24 fracción V y 38 de su Estatuto Orgánico, así como 1° y 12 inciso e) y su penúltimo párrafo del Acuerdo que Delega Facultades en los Directores Generales Adjuntos, Coordinador, Directores Divisionales, Titulares de las Oficinas Regionales, Subdirectores Divisionales, Coordinadores Departamentales y otros Subalternos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

ATENTAMENTE Sergio Odin Castillo Espino



Figura 7. Décima hoja de la solicitud de registro de Patente.





DIRECCION DIVISIONAL DE ASUNTOS JURIDICOS SUBDIRECCION DIVISIONAL DE ASUNTOS JURIDICOS

Cadena Original



SERGIO ODIN CASTILLO ESPINO[CAES800816HDFSSR09|JU/S/2020/006007|RGP-DDAJ-001958/2020|JU/R/2020/001958|17/11/2020 16:11:26|2740|Pág(s) 1|B1ftplL9ZWrbpE3y1ShLaC0MgtQ=tiTxArzIgacPFLilLjcznPaGA9E=xXw vvKECWPigb7rFzqbQBGzxj98=ao7Pblu6dqABXbwErkz1mrwWOmQ=i6 W4BFPajmIAKLuH6ItMLCMxROc=A2pXESER451hcQcocSwXfe3Xxvk=

Sello Digital eaWvkIZGdueMZIQ5nIsSLfVOra68Goxt/MbxS1DGqU8UbZ70+bk/MK9u Rn/iusSRaquQp3ICPhHCz8HF

8uQhRvAlKiuZgNGuklvCTODJbgcLTL7TpRn3XCACS9drdadyd0/UIFSyZ D08EiOLEtsfQboMPGLao5uf AYNWfKuL5/x7zF0f7pE5mU+PK/ko7pY6JeZ06lpGel8VXfvWMRUdEwIZ

JdZd0zkSv0euWy9TbsexzInQ

iScBWtyvmyZbYUdPKutWDKWXV957gtwGohkemtZljy7AAZEvqTdeafyJ u5LYSs4HQODSD7+gtgjuDZe/ gQeyDY/9ngIMd+jklLRfag=

Para verificar la autenticidad del presente documento, podrá ingresar a la página electrónica https://validadocumento.impi.gob.mx/, escaneando el código QR que aparece a un costado de la FIEL (Firma Electrónica Avanzada) del Servidor Público que signó el mismo, indicando, en su caso, el tipo de documento que pretende validar(solicitud, acuse, oficio o promoción); lo anterior con fundamento en lo dispuesto por los artículos 1º fracción III, 2º fracciones II y V, 25, 26 BIS y 26 TER del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, en los trámites que se indican.



Figura 8. Décimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente.

MEDICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO CON VISIÓN ARTIFICIAL

Cristóbal M., I.¹; Prado H., J.V.²; Velázquez L., N.³; Cristóbal A., D.².

¹Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, ²Departamento de Suelos, ³Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México Texcoco km. 38.5, Chapingo, México. C.P. 56230.

Correo-e: irouri.cristobal.munoz@gmail.com

Introducción

En México la agricultura es el sector que más agua consume en el país, la demanda de agua por este sector se incrementó en 15.4% entre 2001 y 2014, de seguir con esta tendencia se pronostica un escenario bastante desfavorable en la disponibilidad de aqua para el año 2030, debido a esto uno de los aspectos de mayor relevancia nacional es reducir el consumo de agua en relación a la producción obtenida (SEMARNAT, 2016). Una solución a esta problemática es mejorar las técnicas de aplicación del agua de riego y el riego por goteo es una de las formas de aplicación más eficientes. Diversos investigadores han realizado investigaciones en campo y laboratorio de los patrones de humedecimiento en riego por goteo, con el fin de optimizar la aplicación de agua con esa técnica de riego. En la mayoría de las investigaciones efectuadas en laboratorio se utilizan modelos físicos de paredes transparentes para observar los patrones de humedecimiento de una fuente puntual de riego, en tiempo real y sin alterar físicamente el suelo durante las mediciones, pero la medición manual de alta frecuencia de su evolución espacio-temporal es tediosa y tardada, a menos que se cuente con equipos automatizados y precisos los cuales usualmente son muy caros. Por este motivo el objetivo de esta investigación fue desarrollar un sistema de visión artificial capaz de identificar los patrones de humedecimiento, y medir con una exactitud aceptable los avances horizontales y verticales del frente de mojado.

Materiales y Métodos

Se adaptó la metodología utilizada por Velázquez-López et al. (2011), en la detección de cenicilla en rosa usando procesamiento de imágenes por computadora, a la metodología utilizada por Cristóbal-Muñoz (2019) en la obtención del patrón de humedecimiento en riego por goteo en un modelo físico de paredes transparentes; a partir de ambas metodologías se propuso el sistema experimental que se muestra en la Figura 1. Se realizó un sistema experimental a escala en el que se utilizó una computadora ASUS con un procesador CORE i7, una cámara web VIVITAR VWC104 con una resolución de 720p, un foco RGB wifi, un foco de luz blanca de 45 W, un Softbox, un tripié de cámara réflex y un modelo a escala del contenedor de suelo constituido por un recipiente de prolipropileno, lleno de suelo agrícola de textura franco arenosa con un emisor situado en la superficie del suelo. La cámara fotográfica se colocó a una altura de 70 cm y una separación de 30 cm del objetivo. La implementación del algoritmo para obtener la evolución del bulbo de mojado se hizo en Microsoft Visual Studio (Community) y las librerías de OPEN CV 4.4. Dicho algoritmo consta de tres etapas secuenciales: 1) automatización de la captura y guardado de imágenes en un intervalo de tiempo elegido, 2) rectificación de las imágenes guardadas con los parámetros de calibración obtenidos, y 3) identificación de la geometría del bulbo húmedo, a partir de una máscara binaria de la imagen en la que el color blanco se asocia con presencia del bulbo húmedo y con negro su ausencia (Figura 2). En la etapa tres se realiza un escaneo de la imagen binaria para encontrar la ubicación del emisor y los puntos más lejanos del frente de mojado respecto del emisor (Figura 3). En este trabajo se comparó la

Figura 9. Décimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente.

evolución temporal de los valores observados y estimados de solamente las distancias verticales y horizontales del frente de mojado respecto al emisor.

Resultados y Discusión

La raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) entre las mediciones manuales y las estimadas con el algoritmo propuesto fue de 0.036 centímetros para la dimensión horizontal y 0.066 centímetros para la dimensión vertical, resultados considerados como excelentes. El umbral óptimo encontrado para este trabajo en el espacio de color HSV fue H de 0-255, S de 0-56 y V de 44-57.



Figura 1. Sistema experimental propuesto.





Figura 2. Identificación del bulbo húmedo.

Figura 3. Medición de las dimensiones de mojado.

Conclusiones

Se desarrolló un sistema de visión artificial capaz de tomar imágenes del bulbo húmedo en tiempo real, eliminar la distorsión de dichas imágenes, identificar la geometría del bulbo húmedo y medir las dimensiones de mojado con una exactitud aceptable. Los mejores resultados se obtuvieron en el espacio de color HSV, utilizando un foco wifi de luz blanca y moviendo 6 grados el ángulo horizontal del tripié.

Literatura citada

- Cristóbal-Muñoz, I. (2019). Medición y análisis del patrón de humedecimiento en riego por goteo superficial en un suelo franco arcillo arenoso. Tesis de licenciatura, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, México: 45-63
- SEMARNAT. (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. Semarnat. México. 380-381.
- Velázquez-López, N., Sasaki, Y., Nakano, K., Mejía-Muñoz, J. M., & Romanchik Kriuchkova, E. (2011). Detección de cenicilla en rosa usando procesamiento de imágenes por computadora. Revista Chapingo. Serie horticultura, 17(2), 151-160.

Figura 10. Décimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.

DISPOSITIVO Y MÉTODO PARA MEDIR CON VISIÓN ARTIFICIAL LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO

1

5 CAMPO DE LA INVENCIÓN

La presente invención está relacionada en lo general con la mecatrónica y la automatización, así como con la agricultura y los sistemas de riego para la producción de cultivos; en lo particular se 10 refiere a un novedoso dispositivo y método para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

15

El alto consumo de agua disponible por la agricultura, la baja eficiencia en su uso a nivel mundial, y la fuerte competencia por dicho recurso por los diferentes sectores, demandan a la agricultura una optimización de la producción de alimentos, utilizando menos agua,

- 20 sin degradar el suelo y los recursos hídricos (Skaggs et al., 2004). La tecnología de riego por goteo puede ayudar a enfrentar este desafío, otorgando a los productores un mayor control sobre la aplicación de agua, fertilizantes y pesticidas (Subbaiah & Mashru, 2013). Para lograr el potencial que ofrece la tecnología del riego por goteo, es
- 25 necesario optimizar aspectos de diseño y operación, tales como:

Figura 11. Décimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente.

2

espaciamiento de instalación de los emisores, caudales de los emisores, frecuencia y tiempo del riego (Skaggs et al., 2004).

La técnica de aplicación del riego por goteo, actualmente se emplea 5 en muchos lugares del mundo (Subbaiah, 2013). El objetivo de esta forma de aplicación de riego es suministrar agua a un volumen de suelo limitado en la zona activa de absorción de las raíces, mejorando el aprovechamiento de los nutrimentos y la efectividad del combate de plagas y enfermedades (Amin & Ekhmaj, 2006). Uno de los aspectos

- 10 importantes del diseño y operación del riego por goteo es la geometría del bulbo húmedo del agua en el suelo (Hammami et al., 2002), pues con dicha información se puede determinar el espaciamiento óptimo entre emisores para cubrir el sistema radicular de la planta, entre otras aplicaciones (Cruz-Bautista et al., 2016).
- 15

Con el conocimiento de la geometría del bulbo húmedo del agua en el suelo, el emisor o emisores pueden ubicarse adecuadamente para que la planta pueda consumir agua y nutrientes de manera eficiente, con menores costos por labores culturales y mayores ingresos por el

20 aumento del rendimiento (Amin & Ekhmaj, 2006; Skaggs et al., 2010; Subbaiah & Mashru, 2013). En cuestiones prácticas de diseño y operación del riego por goteo, el bulbo húmedo puede ser definido por su ancho en la superficie del suelo y su profundidad (Malek & Peters, 2011; Al-Ogaidi et al., 2015).

25

Figura 12. Décimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente.

En la actualidad existen distintas formas o métodos de medir la geometría del bulbo húmedo, pero estos métodos tienen fuertes limitaciones y no pueden ser usados en la automatización de procesos productivos agrícolas a gran escala y en la toma de decisiones en

3

5 tiempo real. Estos métodos de medir la geometría del bulbo húmedo son más utilizados en aplicaciones de diseño del riego por goteo que en aplicaciones de operación del riego en procesos productivos, debido principalmente a sus limitantes. A continuación, se muestran algunos ejemplos de los métodos mencionados para la medición de la 10 geometría del bulbo húmedo en riego por goteo.

Medición manual.

En México Cruz-Bautista et al. (2016) midieron la geometría del bulbo húmedo en campo con diferentes condiciones experimentales a partir

15 del método manual. De igual manera Cristóbal-Muñoz et al. (2022) utilizaron el método manual para obtener la geometría del bulbo húmedo en distintas condiciones experimentales, la diferencia fue que realizaron las mediciones en laboratorio y utilizaron un modelo físico de paredes transparentes para poder dibujar la geometría del bulbo 20 húmedo en distintos tiempos de riego.

El procedimiento de medición y registro manual tiene los inconvenientes de ser repetitivo, tedioso y tardado. Por ejemplo, algunos riegos pueden durar hasta 10 horas, por lo anterior la 25 medición de alta frecuencia con el método manual no es una opción y

Figura 13. Décimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente.

normalmente se opta por mediciones en intervalos de una hora o media hora, pero al realizar esto se puede omitir información importante de la evolución espacio-temporal de la geometría del bulbo húmedo, principalmente al inicio de los riegos.

4

5

Al ser una persona quien realizará las mediciones se aumenta "el error humano o de operador". Al inicio la persona encargada de medir y registrar realizará con mucho cuidado las mediciones, pero a la mitad y al final del proceso será probable que descuide las mediciones por 10 cansancio o aburrimiento.

El procesamiento de la información es tardado y difícil, se puede tardar hasta días para la generación de figuras de la geometría del bulbo húmedo y la generación de tablas con los avances máximos en

15 los ejes "X" y "Y" en distintos tiempos de riego. Información importante para los técnicos e investigadores de riego, que es usada en la optimización del diseño y operación del riego por goteo.

Se aumenta el error en la etapa del procesamiento de la información, 20 debido al pasar la gran cantidad de información en formato físico (libreta) a un formato digital (computadora), por este motivo será probable que se cometan errores del tipo humano.

Por otro lado, no es posible su uso en la automatización de procesos 25 productivos agrícolas a gran escala y en la toma de decisiones en

Figura 14. Vigésima hoja de la solicitud de registro de Patente.

tiempo real.

• Medición con fotografías y softwares de procesamiento de imágenes.

5

- 5 En Turquía Kilik (2020) midió la geometría del bulbo húmedo en laboratorio con un modelo físico de paredes transparentes y con el procesamiento de imágenes tomadas por una cámara, pero en el trabajo publicado falta información importante de este procedimiento, por ejemplo no se menciona cómo se tomaron las fotografías, tampoco
- 10 cómo se procesaron las imágenes y no se describe si se calibró e instaló correctamente la cámara, tampoco se divulga, ni se menciona que tipo de software se utilizó, etc.

La medición de alta frecuencia con este método no es una opción al 15 igual que en el método manual, debido a que entre mayor cantidad de fotografías tomadas se incrementa inmensamente la carga de trabajo al usuario del software en el proceso de medición y procesamiento de la información.

20 Al ser una persona quien tome las fotografías se pueden cometer errores del tipo humano en el proceso de captura de imágenes.

Se deben tener cuidados especiales en el proceso de captura de las fotografías y normalmente estos cuidados no se realizan, ya que los 25 técnicos e investigadores de riego por lo general no están

Figura 15. Vigésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente.

familiarizados con estos temas. Por ejemplo, todas las fotografías deben ser tomadas desde un mismo dispositivo, si se utilizaran más dispositivos se debe contemplar que cada cámara tiene características específicas y genera distintas distorsiones de las imágenes tomadas

6

- 5 por otras cámaras, generando una variación entre las fotografías de un dispositivo a otro. Es necesario calibrar la cámara para eliminar la distorsión de las imágenes tomadas, en la mayoría de los casos la calibración de las cámaras no se realiza. Es esencial que las fotografías sean tomadas desde un mismo punto, tengan un mismo
- 10 ángulo de toma y la cámara esté paralela a la superficie de interés que se requiere capturar (superficie del suelo humedecida).

Si se cumplen los cuidados especiales en el proceso de captura de las fotografías, dentro de alguna de las imágenes tomadas debe estar un 15 objeto de longitud conocida para poder transformar la distancia en

pixeles a distancia real.

La identificación y medición de la geometría del bulbo húmedo se realiza en cada fotografía y la tiene que realizar un usuario de manera 20 manual dentro del software, dando la posibilidad de cometer errores del tipo humano.

El procesamiento de la información es tardado y difícil, se puede tardar hasta días para la generación de figuras de la geometría del 25 bulbo húmedo y la generación de tablas con los avances máximos en

Figura 16. Vigésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente.

7

los ejes "X" y "Y" en distintos tiempos de riego.

Se aumenta el error en la etapa del procesamiento de la información, debido a que una persona debe pasar la gran cantidad de información 5 de varias imágenes a una sola figura digital, por este motivo será

- probable que se cometan errores del tipo humano. No cualquier persona puede realizar este método de medición, se requiere que la persona quien realice las mediciones y el procesamiento de la información este capacitada en temas computacionales y en el uso de
- 10 softwares de procesamiento de imágenes; además no es posible su uso en la automatización de procesos productivos agrícolas a gran escala y en la toma de decisiones en tiempo real.

 Medición con sensores de humedad del suelo o electrodos de 15 resistividad eléctrica.

En Italia Vanella et al. (2021) midieron la geometría del bulbo húmedo y los patrones de humedecimiento del agua en el suelo a partir de imágenes de resistividad eléctrica, tomadas con un sistema de 72 20 electrodos colocados estratégicamente en dos pequeñas superficies.

En Florida (USA) Júnior et al. (2016) midieron la geometría del bulbo húmedo a partir de tres métodos, uno de los métodos fue a partir del procesamiento de fotografías donde la identificación del bulbo húmedo 25 se realizaba con un tinte azul en la solución del agua de riego, otro

Figura 17. Vigésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente.

de los métodos fue el uso de sensores de humedad del suelo. Los autores del trabajo mencionan en sus conclusiones que el método de procesamiento de fotografías es muy laborioso y que el método con sensores de humedad del suelo es demasiado costoso, concordando 5 con lo afirmado por nosotros anteriormente.

8

Para este método de medición es necesario un preprocesamiento de la información para poder estimar la geometría del bulbo húmedo a partir de las mediciones de humedad del suelo o de mediciones de 10 resistividad eléctrica, es decir se debe recopilar la información de cada sensor o electrodo, juntar la información en un solo archivo,

Existe un error integrado y adicional debido a que el método se basa 15 en una estimación, es decir que no se realiza la medición directa de la información de interés.

llenar datos faltantes, corregir datos erróneos, etc.

La medición de alta frecuencia con este método no es una opción al igual que en el método manual y en el método con softwares de 20 procesamiento de imágenes, debido a que entre mayor cantidad de información tomada se incrementa inmensamente la carga de trabajo en el preprocesamiento y procesamiento de la información.

El procedimiento de instalación es tardado, complicado y se deben 25 tener cuidados especiales. Por ejemplo, si se genera una pequeña

Figura 18. Vigésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente.
cavidad en el suelo por mover accidentalmente un sensor o electrodo, los aparatos empezaran a medir aire, además que una mala instalación en un solo sensor o electrodo puede comprometer los resultados de todo el proceso de medición.

9

5

El número de sensores a utilizar y su posición se define de manera empírica, es decir que se pueden obtener resultados insatisfactorios por una mala elección del número de sensores a utilizar y de su configuración en el perfil del suelo.

10

Por lo general se necesitan varios sensores o electrodos para obtener resultados aceptables, además el costo de adquisición y mantenimiento de estos equipos es elevado.

- 15 El método es del tipo invasivo, es decir que al instalar los sensores en el perfil del suelo se modifican las propiedades originales del sitio de estudio, generando una variación considerable contra lo observado en un sitio inalterado. Además el procesamiento de la información es tardado y difícil, se puede tardar hasta días para la generación de
- 20 figuras de la geometría del bulbo húmedo y la generación de tablas con los avances máximos en los ejes "X" y "Y" en distintos tiempos de riego.

No cualquier persona puede realizar este método de medición, se 25 requiere que la persona quien realice las mediciones y el

Figura 19. Vigésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente.

procesamiento de la información este capacitada en temas computacionales, en el uso de softwares graficadores, además en la instalación y uso de sensores o electrodos.

10

- 5 Es posible su uso en la automatización de procesos productivos agrícolas a gran escala y en la toma de decisiones en tiempo real, pero su costo de adquisición y mantenimiento se elevan a niveles extraordinarios, solo se podría utilizar este método en cultivos muy rentables.
- 10

La presente invención está dirigida a un novedoso dispositivo y método para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo.

- 15 Ante la necesidad de resolver la problemática existente en este campo técnico fue que se desarrolló la presente invención cuyo propósito es medir la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo de una manera automática, eficiente, práctica y rápida, solventando las limitaciones de los otros métodos de medición.
- 20

OBJETIVOS DE LA INVENCIÓN

La invención tiene como objetivo principal hacer disponible un 25 novedoso dispositivo y método para medir con visión artificial la

Figura 20. Vigésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.

geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, que permita establecer el correcto diseño y funcionamiento del riego por goteo en campo e invernaderos, permita determinar la separación óptima entre emisores, la identificación de emisores dañados o tapados, la
5 selección del caudal del emisor, la selección de un tiempo y frecuencia de riego adecuado, así como la optimización del uso de agua y

- de riego adecuado, así como la optimización del uso de agua y fertilizantes, y que ofrezca aplicaciones agrícolas con el Internet de las Cosas, etc.
- 10 Otro objetivo de la invención es proveer dicho dispositivo y método para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, que además permita hacer la medición de una manera automática, eficiente, práctica y rápida a través de un método de medición directa en donde no sea necesario el preprocesamiento de
- 15 la información, es decir que no tendrá un error adicional por basarse en un principio de estimación y no se tendrán que hacer pasos previos como es el caso del uso de sensores y electrodos.

Otro objetivo de la invención es proveer dicho dispositivo y método 20 para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, que además permita una medición de alta frecuencia, de una manera rápida, eficiente y precisa.

Otro objetivo de la invención es proveer dicho dispositivo y método 25 para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego

Figura 21. Vigésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente.

por goteo, que además permita eliminar el error humano en el proceso de medición, registro y procesamiento de la información.

Otro objetivo de la invención es proveer dicho dispositivo y método 5 para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, que además evite modificar las propiedades originales del sitio de estudio y que sea de bajo costo de adquisición y mantenimiento.

- 10 Otro objetivo de la invención es proveer dicho dispositivo y método para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, que además sea portátil y pueda montarse en vehículos que puede desplazarse a través del terreno para efectuar las mediciones.
- 15 Otro objetivo de la invención es proveer dicho dispositivo y método para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, que además sea de fácil utilización en donde cualquier persona puede utilizarlo sin necesidad de requiere capacitación especializada para su uso.
- 20

Otro objetivo de la invención es proveer dicho dispositivo y método para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, que además pueda ser usado en la automatización de procesos productivos agrícolas a gran escala y en la toma de 25 decisiones en tiempo real, debido a que tiene la capacidad de poder

Figura 22. Vigésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente.

guardar la información en la nube o en una memoria interna, además de poder ser instalada en un vehículo tripulado o no tripulado.

 Y todas aquellas cualidades y objetivos que se harán aparentes al
 5 realizar una descripción general y detallada de la presente invención apoyados en las modalidades ilustradas.

BREVE DESCRIPCIÓN DEL INVENTO

10

La concepción y la materialización del dispositivo y método para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, fue bastante difícil, ya que surgió a partir de una necesidad y de la aplicación de conocimientos de múltiples áreas como son la

- 15 programación, irrigación, visión artificial, optimización, agronomía, etc.. Posteriormente fue aún más difícil tomar todos estos conocimientos, integrarlos y plasmarlos en la realidad con un prototipo funcional que pueda medir la geometría del bulbo húmedo de una manera automática, eficiente, práctica y rápida.
- 20

Fue necesario financiamiento debido al costo de adquisición de los componentes de la presente invención y su costo de construcción. La programación del algoritmo o código fue bastante compleja, ya que contempla varios subprocesos o secciones con una dificultad 25 considerable de programación.

Figura 23. Vigésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente.

Aterrizar algunos conceptos de visión artificial (visión por computadora) de otros campos técnicos a temas de riego fue bastante complejo, ya que hay poca información disponible respecto aplicaciones de riego. En el caso de la medición de la geometría del 5 bulbo húmedo con visión artificial la información disponible fue nula.

14

Encontrar el espacio de color adecuado y el umbral óptimo de esta aplicación en sus distintos escenarios físicos de riego e implementarlos en el algoritmo de medición y procesamiento fue 10 bastante difícil, en especial cuando hay humedad antecedente debido a un riego previo.

Comprobar el correcto funcionamiento de la invención en condiciones normales de riego, se requirió de bastante tiempo y recursos poder 15 verificar el correcto funcionamiento de la presente invención, además de múltiples pruebas experimentales.

De manera general el dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de conformidad con

- 20 la presente invención consta de una computadora configurada para conectarse con: al menos una cámara digital o térmica que se calibra a partir de los coeficientes de distorsión y los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la propia cámara, definidos por la matriz específica de la cámara y configurada para disponer perpendicularmente con
- 25 respecto a una superficie de suelo para enfocar y tomar imágenes del

Figura 24. Trigésima hoja de la solicitud de registro de Patente.

bulbo húmedo en una superficie de suelo; con un dispositivo medidor de distancia para obtener una distancia desde la parte frontal del lente de la cámara que toma las imágenes del bulbo húmedo hasta la superficie de suelo donde se encuentra el bulbo húmedo y usarse para

- 5 calcular la geometría del bulbo húmedo; un sistema de enfriamiento o regulador de temperatura controlado por dicha computadora para hacer circular aire de enfriamiento dentro del dispositivo; un sistema de interfase persona-máquina para la interacción entre el usuario y el dispositivo; un sistema de comunicación de información del dispositivo
- 10 vía física o internet desde la computadora hacia los usuario y un carcasa donde se alojan dichos componentes, con un sistema de soporte y nivelación y una fuente de alimentación de energía para la computadora y que proporciona energía a través de la computadora a la cámara, al dispositivo medidor de distancia, al sistema de 15 enfriamiento o regulador de temperatura y al sistema de interface
- 15 entriamiento o regulador de temperatura y al sistema de interface persona - máquina de la presente invención.

Dicha computadora se selecciona del grupo que consta de una computadora comercial o armada por componentes (Workstation, 20 escritorio, portátil, etc.); un ordenador de placa reducida (Small Board Computer) o también conocido como ordenador de placa única (Single Board Computer), una Unidad Central de Procesamiento (CPU) con solo algunos componentes periféricos.

25 Las opciones son amplias para este componente de la presente

Figura 25. Trigésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente.

invención, pero lo ideal para la presente invención y su diseño óptimo sería utilizar un ordenador de placa reducida o también conocido como ordenador de placa única (SBC por sus siglas en ingles), ya que se cubren los requerimientos de velocidad de procesamiento y memoria

- 5 para la medición automática de la geometría del bulbo húmedo, además de tener un tamaño y costo económico menor en comparación a una computadora comercial, al mismo tiempo es fácil de conseguir y utilizar en comparación de solamente comprar un CPU y algunos componentes periféricos.
- 10

Algunas opciones de ordenador de placa única (SBC por sus siglas en inglés) son Arduino, ECB AT9, Gumstix, Raspberry Pi, Orange Pi, NVIDIA Jetson Nano, etc. Es importante mencionar que en los ordenadores de placa única (SBC por sus siglas en inglés) la
15 configuración y posicionamiento de los componentes varía dependiendo de la marca y modelo, generando pequeños cambios en el diseño de la presente invención dependiendo de que modelo y marca se utilice, pero sin cambiar la esencia y funcionalidad de la presente

20

invención.

En la modalidad preferida de la invención se emplea como ordenador de placa única (SBC por sus siglas en inglés) un Raspberry Pi 4 Modelo B por ser una opción bastante utilizada en proyectos de visión por computadora en otros campos técnicos y por ser accesible en 25 precio.

Figura 26. Trigésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente.

En la modalidad preferida de la invención dicha al menos una cámara digital o térmica es una cámara compatible con puertos USB o CSI (del inglés, Camera Serial Interface) o al cabezal GPIO de Raspberry Pi 4 Model B, estas pueden ser multiobjetivo, compactas, etc. Para la 5 presente invención se utilizó Raspberry Pi Camera Module 2 con una carcasa plástica cubica.

Dicho dispositivo medidor de distancia para obtener una distancia desde la parte frontal del lente de la cámara que toma las imágenes 10 del bulbo húmedo hasta la superficie de suelo donde se encuentra el bulbo húmedo se selecciona de medidores de distancias láser o sónicos, compatibles con el SBC Raspberry Pi 4 Model B, o una segunda cámara y seguir el principio de la "visión estereoscópica" para medir la profundidad o distancia entre las cámaras y la superficie

15 de interés. Preferentemente para la presente invención se utilizó el sensor de distancia Industrial Laser Distance Sensor B87A-b200416 JRT.

Dicha fuente de alimentación de energía para dicha computadora
20 puede ser cualquier cargador compatible con Raspberry Pi 4 Model B que cumpla con el voltaje y amperaje de corriente directa requerido (5 volts y 3 amperes), paneles solares, baterías de plomo y acido, baterías portátiles (Power Bank), adaptadores con baterías de litio o alcalinas, etc. Para la presente invención se utilizó Raspberry Pi 15W
25 USB-C Power Supply (cargador oficial), además se utilizó Anker

Figura 27. Trigésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente.

PowerCore II 10000 Portable Charger (batería portátil). La fuente de alimentación proporciona energía a través de la computadora a la cámara, al dispositivo medidor de distancia, al sistema de enfriamiento o regulador de temperatura y al sistema de interface 5 persona - máquina de la presente invención.

18

Dicho sistema de interfase persona-máquina para la interacción entre el usuario y el dispositivo se seleccionan de monitores, pantallas, teclados, sensores, series led, potenciómetros, entre otros o 10 combinaciones de los mismos.

En este componente hay un sinfín de combinaciones posibles de dispositivos periféricos, dependiendo de que combinación se utilice se modifica un poco la configuración y posicionamiento de los demás 15 componentes de la presente invención, pero sin cambiar la esencia de

la presente invención.

En la presente invención se utilizó una Raspberry Pi Touch Display (pantalla táctil), una placa PCB o placa de circuito impreso,
20 prolongadores cortos para cable USB, prolongador corto para cable Gigabit Ethernet, interruptores del tipo pulsadores para un teclado de funciones, una serie led, resistencias eléctricas y cables.

Dicho sistema de enfriamiento o regulador de temperatura controlado 25 por dicha computadora para hacer circular aire de enfriamiento dentro

Figura 28. Trigésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente.

del dispositivo se selecciona de ventiladores individuales, sensores
de temperatura conectados a ventiladores, sistemas de regulación de
temperatura para computadoras, etc. Para la presente invención se
utilizó un ventilador "Raspberry Pi Cooling Fan EasyCargo" en
5 combinación con algunos orificios en la base y en la parte superior de

- la carcasa para la entrada de aire del exterior y para la salida de aire caliente.
- La carcasa que resguarda los componentes del dispositivo puede ser 10 de cualquier color, material y diseño que cumplan la función de proteger y fijar los componentes de la presente invención, en donde la base de la carcasa debe ser compatible con diversos sistemas de soporte.
- 15 Para la presente invención se utilizó una carcasa plástica con un parasol y una base atornillable hecha por una impresora 3D.

El sistema de soporte y nivelación del dispositivo puede ser cualquier sistema de soporte que permita ubicar el dispositivo a distintas alturas

20 y ángulos de toma, asegurando que la invención no se moverá durante las mediciones, permitiendo la captura de la información. Por ejemplo, trípodes, estabilizadores, brazos mecánicos, etc.

De igual manera para la automatización de procesos productivos 25 agrícolas a gran escala se pudiera adaptar la presente invención a un

Figura 29. Trigésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente.

vehículo tripulado o no tripulado, como lo son drones, vehículos terrestres, rieles de inducción magnética, robots, etc. Para la presente invención se utilizó un trípode de cámara réflex y un soporte rudimentario.

20

5

Dicho dispositivo para la medición de la geometría del bulbo húmedo del agua en el suelo, en riego por goteo con visión artificial, además comprende como sistema de nivelación que consiste en un sistema de nivelación de burbuja.

10

Funcionamiento del dispositivo de la presente invención

El dispositivo para la medición de la geometría del bulbo húmedo del agua en el suelo, en riego por goteo con visión artificial puede 15 colocarse en cualquier orientación y posición, pero en la gran mayoría

de los casos la geometría del bulbo húmedo se requiere medir colocando el dispositivo horizontal o verticalmente.

Calibración de dicha al menos una cámara

- 20 Al realizar trabajos con visión por computadora es importante calibrar la al menos una cámara, debido a que algunas cámaras introducen una distorsión significativa en las imágenes. Existen dos tipos principales de distorsión, estas son la distorsión radial y la distorsión tangencial. La distorsión radial hace que las líneas rectas parezcan curvas y
- 25 vuelve más grande los objetos cuanto más lejos están los puntos del

Figura 30. Trigésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.

centro de la imagen, la distorsión tangencial se produce porque la lente de toma de imágenes no está alineada perfectamente paralela al plano de imagen, por este motivo algunas áreas de la imagen pueden verse más cercanas de lo esperado.

21

5

En resumen, se necesita realizar una calibración a la cámara o cámaras (en caso de utilizar visión estereoscópica) de la presente invención a partir de los coeficientes de distorsión y los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara, definidos por la matriz

10 específica de la cámara. Existen diversos métodos de calibración de cámaras que se pudieran utilizar, pero se recomienda el método de Zhang (2000) por ser ampliamente estudiado y comprobado, el método consiste en que la cámara observe un patrón plano que se muestre en diferentes orientaciones, tanto la cámara como el patrón plano se 15 pueden mover libremente

Transformación de la distancia en pixeles a distancia real La transformación de distancia en pixeles a distancia real realizada por la presente invención es similar al principio utilizado en el análisis

20 de imágenes satelitales, donde se tiene que conocer ciertos aspectos de la cámara como lo son el tamaño del sensor, resolución del sensor, distancia focal, tipo de lente, campo de visión horizontal y vertical, etc.

25 Estos aspectos se pueden conseguir revisando las especificaciones o

Figura 31. Trigésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente.

documentos técnicos de la cámara, pero la distancia de trabajo (distancia desde la parte frontal del lente hasta el objeto bajo inspección o área de interés) dependerá de donde se coloque la cámara en cada situación de captura de imágenes, por este motivo
5 para conocer este parámetro es importante un dispositivo medidor de distancias integrado a la presente invención.

Dependiendo de que tan grande o pequeña sea esta distancia de trabajo, el factor de conversión de distancia en pixeles de las 10 imágenes a distancia real ira cambiando, es decir que en imágenes capturadas a mayor distancia de trabajo se observará un menor tamaño en la geometría del bulbo húmedo para un mismo tiempo de riego.

Alineación del dispositivo de la presente invención.

- 15 La alineación del dispositivo de la presente invención con la superficie de interés la realiza el usuario a partir del sistema de nivelación al momento de instalar el dispositivo para realizar las mediciones, como se mencionó anteriormente en la gran mayoría de los casos la geometría del bulbo húmedo se requiere medir posicionando el
- 20 dispositivo horizontal o verticalmente, por este motivo el sistema de nivelación de burbuja cubre los requerimientos de la aplicación, pero sí fuera necesario una mayor precisión como en aplicaciones de investigación, se pudiera integrar el método propuesto por Tatsuno et al. (2005) que consiste en implementar un sistema 2-D de localización
- 25 utilizando un solo sensor láser para medir distancia, donde se

Figura 32. Trigésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente.

23 verificaría que la cámara de la presente invención se encuentra

paralela con respecto a la superficie de interés.

Visión por computadora, espacio o modelo de color y umbralización.

5 La presente invención utiliza ciertos principios del campo técnico de "Visión por computadora", por tal motivo es importante dar una breve explicación de estos principios.

La visión artificial se puede definir como un campo de la "inteligencia 10 artificial" que, mediante la utilización de las técnicas adecuadas, permite la obtención, procesamiento y análisis de cualquier tipo de información especial obtenida a través de imágenes digitales. La visión por computadora forma parte de la visión artificial, en esta se trata de alguna forma de emular en las computadoras, la capacidad de

15 reconocimiento de nuestra vista y cerebro, de forma que, mediante la interpretación de las imágenes adquiridas, se puedan reconocer los diversos objetos en el ambiente y su posición en el espacio.

De igual manera en los trabajos de visión por computadora existe el 20 concepto de modelo o espacio de color, el objetivo de un modelo de color es facilitar la especificación de los colores de una forma normalizada y aceptada genéricamente. En esencia, un modelo de color es la especificación de un sistema de coordenadas tridimensional y de un subespacio de este sistema en el que cada color 25 queda representado por un único punto.

Figura 33. Trigésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente.

Una imagen en color está especificada por sus componentes RGB (Red, Green, Blue). El modelo RGB es recomendable para visualizar el color, pero no es bueno para su análisis ya que existe un alto grado de correlación entre sus componentes R, G y B. Además, la distancia 5 en el espacio de color RGB no representa las diferencias de colores tal como el sistema visual humano las percibe. Por esta razón en el análisis y procesamiento de las imágenes, muchas veces se transforman estos componentes en otro espacio de color.

24

- 10 Por ejemplo, en la presente invención se realiza una conversión entre los espacios de color RGB y HSV (Hue, Saturation, Value). Esta conversión permite la extracción de partes o colores específicos de las imágenes, debido a que la imagen original es dividida en 3 canales (H, S y V). HSV son definidos matemáticamente por transformaciones
- 15 entre R, G y B y las coordenadas de los colores en el espacio RGB y las coordenadas de H, S y V del espacio HSV. Las Conversiones de RGB a HSV están representadas por las siguientes ecuaciones:

$$H = \begin{cases} 60 \cdot \frac{G-B}{\max(R,G,B) - \min(R,G,B)} + 0, & donde \ \max(R,G,B) = R \\ 60 \cdot \frac{B-R}{\max(R,G,B) - \min(R,G,B)} + 120, & donde \ \max(R,G,B) = G \\ 60 \cdot \frac{R-G}{\max(R,G,B) - \min(R,G,B)} + 240, & donde \ \max(R,G,B) = B \end{cases}$$
$$S = \frac{\max(R,G,B) - \min(R,G,B)}{\max(R,G,B)}$$
$$V = \max(R,G,B)$$

25

20

Figura 34. Cuadragésima hoja de la solicitud de registro de Patente.

En HSV, H representa el tipo de color. H es un ángulo que va de O a 360 grados. S indica la gama de grises en el espacio de color, este va de 0 a 100 %. V es el brillo del color, este va de 0 a 100 %. Cuando el valor es 0 el espacio de color será totalmente negro y cuando el 5 valor es 100 el espacio de color será totalmente blanco.

25

A partir de esta conversión se puede realizar el proceso de umbralización, proceso en el cual se busca un umbral óptimo que permita distinguir en una imagen los objetos del fondo de los objetos

10 del primer plano o de interés. La umbralización es parte de los algoritmos de segmentación junto con la discontinuidad y la similitud, que se basan en propiedades básicas de los valores del nivel de gris. Un método de umbralización básico para diferenciar un objeto del fondo de la imagen es mediante binarización. Los principios de

15 binarización y umbralización son utilizados en la presente invención.

Sistema operativo, librerías y código.

El sistema operativo utilizado en el ordenador de placa única (SBC por sus siglas en ingles) de la presente invención es Raspberry Pi OS

20 (GNU/Linux-Debian) y el código de funcionamiento fue desarrollado en Python 3.7.3. y con la ayuda de la librería OpenCV-4.4.0.

OpenCV es una librería de código abierto de visión por computadora, la cual es una librería de alto nivel que implementa algoritmos para 25 técnicas de calibración, detección de características y rastreo, forma,

Figura 35. Cuadragésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente.

análisis de movimiento, reconstrucción 3D, reconocimiento y segmentación de objetos. La librería corre bajo Linux, Windows y Mac OSX (Velázquez-López et al., 2011).

26

- 5 La carcasa de la presente invención contiene la cámara, el dispositivo medidor de distancia, la computadora, el sistema de enfriamiento, la fuente de alimentación, el sistema de nivelación y el sistema de interface persona – maquina, estos tres últimos pueden ser manipulados desde la superficie exterior de la carcasa, los demás
- 10 componentes no pueden ser manipulados físicamente sin tener que abrir la carcasa de la presente invención. La temperatura dentro de la carcasa y por ende de todos los componentes contenidos será regulada a partir del sistema de enfriamiento o regulador de temperatura, donde principalmente se buscará regular la temperatura de la computadora 15 de la presente invención.

El sistema de soporte da movilidad, estabilidad y soporte a la carcasa del dispositivo de la presente invención y por ende a todos los componentes contenidos dentro de ella. El usuario interactúa con el 20 sistema de nivelación, el sistema de interface persona - maquina y

- con el sistema de soporte con la carcasa instalada. El sistema de soporte y de nivelación son necesarios para que el usuario instale el dispositivo de la presente invención donde se requiera medir la geometría del bulbo húmedo. El sistema de interface persona —
- 25 maquina es por donde el usuario se comunicará con la computadora

Figura 36. Cuadragésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente.

de la presente invención.

Al recibir la computadora las instrucciones del usuario a través del sistema de interface persona – maquina, la computadora coordinará
5 las funciones de la cámara y del dispositivo medidor de distancia, donde serán obtenidas la geometría del bulbo húmedo y la distancia entre la cámara y la superficie de interés, respectivamente. Posteriormente esta información pasará a la computadora quien registrará, procesará y guardará la información.

27

10

Por último, la información procesada llegará al usuario vía física (memoria USB) o por internet, también se podrá hacer uso de la información en la automatización de procesos productivos agrícolas a gran escala y en la toma de decisiones en tiempo real como lo

15 menciona Elijah et al. (2018), gracias a que la presente invención puede funcionar y es compatible aplicando el Internet de las cosas (loT, del inglés Internet of Thing).

La invención también provee un método para medir con visión artificial

20 la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, que se caracteriza porque consiste en:

Obtener imágenes de bulbo húmedo de una superficie de riego por goteo mediante al menos una cámara digital o térmica previamente calibrada;

25 Determinar la distancia existente entre la parte frontal del lente

Figura 37. Cuadragésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente.

de la cámara que toma las imágenes del bulbo húmedo hasta la superficie de suelo donde se encuentra el bulbo húmedo a través de un dispositivo medidor de distancia, para usarse en el cálculo y determinación de la geometría del bulbo húmedo;

5 Procesar las imágenes obtenidas del bulbo húmedo mediante conversión entre los espacios de color RGB a HSV;

Eliminación de ruido de las imágenes mediante procesos de binarización y umbralización para definir el primer plano de interés de la geometría del bulbo húmedo, y obtener el perímetro o gradiente de

10 mojado, eliminando el fondo de las imágenes obtenidas;

Buscar y detectar los puntos extremos del bulbo húmedo y transformar la distancia medida en pixeles a distancia real;

Medir la geometría del bulbo húmedo

15 Los aspectos de la presente invención que dan ventajas sobre los anteriores métodos de medición son los siguientes:

 (1) La interface persona - maquina, la carcasa, el sistema de soporte y de nivelación que permiten una instalación rápida y fácil de la
 20 presente invención.

(2) La calibración de la cámara, la transformación de la distancia en pixeles a distancia real a partir de la distancia de trabajo y el método de medición que eliminan los cuidados especiales de otros métodos y aumentan la precisión de las mediciones.

25 (3) La gran variedad de opciones para cada uno de los componentes

Figura 38. Cuadragésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente.

de la presente invención, pudiendo economizar el costo de fabricación si se desea, por ejemplo, utilizar niveles de burbuja tubulares en lugar de niveles digitales.

(4) La computadora (SBC - Raspberry Pi 4 Model B) que permite la

- 5 medición de alta frecuencia y el procesamiento de la información de manera rápida y fácil. Solo se tiene que esperar unos minutos después de finalizar el riego para obtener en formato digital las figuras de la geometría del bulbo húmedo y las tablas con los avances máximos en los ejes "X" y "Y" en distintos tiempos de riego.
- 10 (5) La fuente de alimentación, la carcasa y el sistema de soporte que permite la portabilidad de la presente invención a cualquier sitio de medición.

(6) La posibilidad de visualizar la medición y procesamiento de la información en tiempo real a partir de la pantalla táctil del sistema de

15 interface persona - maquina.

(7) Su método de medición que permite que cualquier persona pueda utilizar la presente invención.

- (8) La posibilidad de usar la presente invención en la automatización
- de procesos productivos agrícolas a gran escala y en la toma de
- 20 decisiones en tiempo real, a partir del Internet de las Cosas (IoT) y de la instalación de la presente invención en un vehículo tripulado o no tripulado.

Para comprender mejor las características de la invención se 25 acompaña a la presente descripción, como parte integrante de la

Figura 39. Cuadragésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente.

misma, los dibujos con carácter ilustrativo más no limitativo, que se describen a continuación.

30

5 BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

La figura 1 muestra un diagrama de bloques de los componentes del dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de conformidad con la modalidad preferida 10 de la invención.

La figura 2 muestra una vista superior de la computadora (1) que para los propósitos de la invención preferentemente es un ordenador de placa única (SBC por sus siglas en ingles) y específicamente un

15 Raspberry Pi 4 Model B, del dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de conformidad con la modalidad preferida de la invención.

Las figuras 3A y 3B muestran una perspectiva en vista lateral del 20 dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, eliminando parte de la carcasa para mostrar los componentes internos, de conformidad con la modalidad preferida de la invención.

25 Las figuras 4A Y 4B muestran una perspectiva en vista lateral del

Figura 40. Cuadragésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.

dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de conformidad con la modalidad preferida de la invención.

31

- 5 La figura 5 muestra una vista inferior del dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de conformidad con la modalidad preferida de la invención.
- La figura 6A muestra una vista en perspectiva convencional del 10 dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, montado en un sistema de soporte tipo trípode.

La figura 6B muestra una vista en perspectiva convencional del 15 dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, montado en un sistema de soporte tipo columna con sistema de contrapeso para equilibrar posicionamiento.

Las figuras 7A y 7B muestran vistas en perspectiva convencional del 20 dispositivo colocado vertical u horizontalmente con respecto a la superficie donde se medirá la geometría del bulbo húmedo.

La figura 8 ilustra una vista una vista en perspectiva lateral del dispositivo sin parte de la carcasa destacando el detalle "A" donde 25 puede ilustrarse la disposición de la lente de la cámara y el dispositivo

Figura 41. Cuadragésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente.

medido de distancia.

La figura 9 muestra una ilustración del dispositivo para la medición de la distancia de trabajo (WD) para el cálculo de la geometría del 5 bulbo húmedo (gbh).

32

La figura 10 muestra una perspectiva convencional del dispositivo de la presente invención para la medición de la distancia de trabajo (WD) para el cálculo de la geometría del bulbo húmedo (gbh), que ilustra 10 diferentes distancias de lectura.

La figura 11 muestra una perspectiva convencional del dispositivo de la presente invención con la opción de conectarse a una red de alimentación fija de corriente alterna.

15

La figura 12 muestra una vista en perspectiva lateral del dispositivo de la presente invención mostrando la disposición del sistema de enfriamiento.

20 La figura 13 muestra detalles de las conexiones del cabezal GPIO con los demás componentes del dispositivo de la presente invención, con una ampliación "C" para mejor apreciación.

La figura 14 muestra el diagrama eléctrico del cabezal extendido GPIO 25 40-Pin y los demás componentes del dispositivo de la presente

Figura 42. Cuadragésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente.

invención.

La figura 15 ilustra una vista en perspectiva convención del dispositivo de la presente invención que muestran información de la 5 serie led, teclado de funciones principales y puertos USB de la presente invención.

33

La figura 16 muestra un diagrama de flujo de la operación del dispositivo de la presente invención.

10

La figura 17 muestra un diagrama de flujo del proceso de medición automática de la geometría del bulbo húmedo de conformidad con la presente invención.

15 La figura 18 muestra una perspectiva convencional del dispositivo de la presente invención instalado para medición en campo.

La figura 19 muestra una perspectiva convencional del dispositivo de la presente invención instalado para medición en laboratorio.

20

La figura 20 muestra un diagrama de los cuadrantes de interés a seleccionar de acuerdo con el tipo de riego para la medición y lectura de la geometría del bulbo húmedo.

25 La figura 21 ilustra un ejemplo de diagrama de la geometría del bulbo

Figura 43. Cuadragésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente.

húmedo los avances máximos en los ejes "X" y "Y".

La figura 22 muestra una diagrama de la lectura y detección automática de la geometría del bulbo húmedo realizada por el
5 dispositivo de medición de la presente invención, en laboratorio, a través de un modelo físico de paredes transparentes, en posición horizontal, con humedad antecedente y la 8va opción de medición.

- La figura 23 muestra una diagrama de la lectura y detección 10 automática de la geometría del bulbo húmedo realizada por el algoritmo de medición de la presente invención, en laboratorio, con medición directa en el suelo, en posición vertical, siendo un primer riego y la 1ra opción de medición.
- 15 Para una mejor comprensión del invento, se pasará a hacer la descripción detallada de alguna de las modalidades del mismo, mostrada en los dibujos que con fines ilustrativos mas no limitativos se anexan a la presente descripción.
- 20

DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL INVENTO

Los detalles característicos del dispositivo y método para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, se 25 muestran claramente en la siguiente descripción y en los dibujos

Figura 44. Quincuagésima hoja de la solicitud de registro de Patente.

ilustrativos que se anexan, sirviendo los mismos signos de referencia para señalar las mismas partes.

35

De acuerdo con la figura 1, el dispositivo para medir con visión 5 artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo de conformidad con la presente invención consta de una computadora (1) preferentemente un ordenador de placa única (SBC por sus siglas en ingles) y específicamente un Raspberry Pi 4 Model B, configurada para conectarse con al menos una cámara digital o térmica (2)

- 10 preferentemente una Raspberry Pi Camera Module 2 con una carcasa plástica cubica, que se calibra a partir de los coeficientes de distorsión y los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la propia cámara, definidos por la matriz específica de la cámara y configurada para disponer perpendicularmente con respecto a una superficie de
- 15 suelo para enfocar y tomar imágenes de la geometría de bulbo húmedo (gbh) en una superficie de suelo; con un dispositivo medidor de distancia (3) preferentemente un medidor de distancia láser Industrial Laser Distance Sensor B87A-b200416 JRT para obtener una distancia (4) desde la parte frontal del lente de la cámara (2) que toma las
- 20 imágenes del bulbo húmedo hasta la superficie de suelo donde se encuentra el bulbo húmedo y usarse para calcular la geometría del bulbo húmedo; un sistema de enfriamiento o regulador de temperatura (5) preferentemente un Raspberry Pi Cooling Fan EasyCargo controlado por dicha computadora (1) para hacer circular aire de
- 25 enfriamiento dentro del dispositivo; un sistema de interfase persona-

Figura 45. Quincuagésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente.

máquina (6) para la interacción entre el usuario (7) y la computadora (1) del dispositivo; un sistema de comunicación de información del dispositivo vía física o internet (8) desde la computadora (1) hacia los usuario (7) que puede comprender un sistema de internet de las costa

- 5 (IoT) y un carcasa (9) que se muestra en esta figura con línea punteada abarcando los componentes que irán en su interior; donde se alojan dichos componentes, con un sistema de soporte (10) y un sistema de nivelación (11) y una fuente de alimentación de energía (12) para la computadora (1) y que proporciona energía a través de la
- 10 computadora (1) a la cámara (2), al dispositivo medidor de distancia
 (3), al sistema de enfriamiento o regulador de temperatura (5) y al sistema de interface persona máquina (6) de la presente invención.

De acuerdo con la figura 2 la computadora (1) que para esta invención

- 15 es un ordenador de placa única (SBC por sus siglas en ingles) y específicamente un Raspberry Pi 4 Model B el cual comprende cuatro puertos USB (13) para conectar diversos componentes, un controlador USB (14), una salida estéreo y puerto de video compuesto (15), un puerto dual CSI de cámara (16) donde se conecta la cámara (2, ver
- 20 figura 2), dos puertos micro HDMI (17), una entrada de alimentación tipo USB-C (18) de la fuente de alimentación de energía (12, ver figura 1), un puerto dual Display DSI (19) del sistema de interfase personamáquina (6, ver figura 1), una entrada para tarjeta microSD (20) para conectar dos memorias, una banda dual Wifi y Bluetooth (21) del
- 25 sistema de comunicación de información del dispositivo vía física o

Figura 46. Quincuagésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente.

internet (8, ver figura 1), un procesador (22), un cabezal extendido
GPIO 40-Pin (23) para conectar fácilmente diversos tipos de sensores
y controladores, una memoria RAM (24), un controlador Ethernet (25)
y un puerto Gigabit Ethernet (26), dichos elementos configurados para
5 conectar diferentes componentes necesarios para la operación del
dispositivo como se describe y se muestra en la figura 1.

De acuerdo con la figura 3A que muestra una perspectiva en vista lateral del dispositivo para medir con visión artificial la geometría del 10 bulbo húmedo en riego por goteo, eliminando parte de la carcasa (9) para mostrar los componentes internos, se aprecian algunos de los componentes del dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, la carcasa (9) contiene los diferentes componentes de la invención, se aprecia una

- 15 serie Led (27) indicadores de operación del dispositivo, una pantalla táctil (28) que forma parte del sistema de interfase persona-máquina (6, ver figura 1), un cable plano DSI (29) para la conexión de dicha pantalla táctil (28) con la computadora (1) que para esta invención es un ordenador de placa única (SBC por sus siglas en ingles) y
- 20 específicamente un Raspberry Pi 4 Model B, la cámara (2) dispuesta en una zona frontal de la carcasa (9) en una sección de pantalla protectora (30), un miniventilador específicamente un "Raspberry Pi Cooling Fan EasyCargo" (31) que forma parte del sistema de enfriamiento o regulador de temperatura (5, ver figura 1); una placa
- 25 PCB o placa de circuito impreso (32) con resistencias eléctricas y

Figura 47. Quincuagésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente.

cables de conexión e Interruptores del tipo pulsadores de un solo polo y 2 vías (33) para el control y encendido del dispositivo.

De acuerdo con la figura 3B que muestra una perspectiva en vista 5 lateral del dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, eliminando parte de la carcasa (9) para mostrar los componentes internos en una modalidad de la presente invención; pero puede tener otras configuraciones, se aprecian algunos de los componentes del dispositivo para medir con

- 10 visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, la carcasa (9) contiene los diferentes componentes de la invención, se aprecian prolongadores de cortos de USB y Gigabit Ethernet (34), la placa PCB o placa de circuito impreso (32) con resistencias eléctricas y cables de conexión, se muestra también la disposición de la
- 15 computadora (1) preferentemente un ordenador de placa única (SBC por sus siglas en ingles) y específicamente un Raspberry Pi 4 Model B, un espacio para batería portátil (35) que forma parte del fuente de alimentación de energía (12, ver figura 1) Se observa también la disposición del dispositivo medidor de distancia (3) preferentemente
- 20 un medidor de distancia láser Industrial Laser Distance Sensor B87Ab200416 JRT y el cable CSI (36) de conexión entre la cámara (2) y la computadora (1) preferentemente un ordenador de placa única (SBC por sus siglas en ingles) y específicamente un Raspberry Pi 4 Model B.
- 25 De acuerdo con la figura 4A se muestran una perspectiva en vista

Figura 48. Quincuagésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente.

lateral del dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de conformidad con la modalidad preferida de la invención, en dicha figura se muestra la serie de Leds (27) indicadores de operación del dispositivo dispuestas en la cara

- 5 superior de la carcasa (9), también se muestran en la carcasa (9) los orificios de ventilación (37) practicados en la pared posterior para la salida de aire caliente, la conexión de la batería portátil (35) en una pared lateral de la carcasa (9) que se conecta al dispositivo mediante el puerto de alimentación tipo USB-C (38) también en la misma pared
- 10 lateral de la carcasa (9); se aprecian los dos puertos micro HDMI (17), una salida estéreo y puerto de video compuesto (39), los cuatro puertos USB (13) y el puerto Gigabit Ethernet (26).

De acuerdo con la figura 4B se muestran una perspectiva en vista 15 lateral del dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de conformidad con la modalidad preferida de la invención, en dicha figura se muestra la pared lateral opuesta del dispositivo en la que se disponen el sistema de nivelación (11) de burbujas, el teclado de funciones principales (40) y la pantalla

- 20 táctil (28) que forman parte del sistema de interfase persona-máquina (6, ver figura 1), así como la base atornillable (41) al sistema de soporte (10, ver figura 1) y la sección de pantalla protectora (30) que funge también como parasol.
- 25 De acuerdo con la figura 5 se muestra una vista inferior del dispositivo

Figura 49. Quincuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente.

para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de conformidad con la modalidad preferida de la invención, en dicha figura puede apreciarse un orificio roscado (42) configurado para conectar el sistema de soporte (no mostrado) y además muestra 5 una ventila (43) en la pared inferior para la entrada de aire frio del

exterior y remover el aire cliente interior que sale por los orificios de ventilación (37) practicados en la pared posterior de la carcasa (9).

De acuerdo con la figura 6, se muestra el dispositivo montado sobre 10 un trípode (44) como sistema de soporte (10, ver figura 1).

De acuerdo con la figura 7, se muestra el dispositivo montado sobre una columna (45) como sistema de soporte (10, ver figura 1).

- 15 De acuerdo con las figuras 7A y 7B el dispositivo se dispone ya sea en posición vertical o en posición horizontal con respecto a la superficie donde se medirá la geometría de bulbo húmedo para obtener los datos "X", "Y" que pueden ser el ancho y largo para poder determinar la geometría de bulbo húmedo (gbh).
- 20

En la figura 8 se muestra una vista en perspectiva lateral del dispositivo sin parte de la carcasa destacando el detalle "A" donde puede ilustrarse la disposición de la lente de la cámara (2) y el dispositivo medido de distancia (3) que se encuentran paralelos entre 25 sí para una mejor lectura.

Figura 50. Quincuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.

En la figura 9 se muestra una ilustración del dispositivo para la medición de la distancia de trabajo (WD) para el cálculo de la geometría del bulbo húmedo (gbh).

41

5 En la figura 10 se puede apreciar como dependiendo de que tan grande o pequeña sea esta distancia de trabajo (WD, ver figura 9), el factor de conversión de distancia en pixeles de las imágenes a distancia real ira cambiando, es decir que en imágenes capturadas a mayor distancia de trabajo se observará un menor tamaño en la geometría del bulbo 10 húmedo (gbh) para un mismo tiempo de riego.

En la figura 11 se muestra una perspectiva convencional del dispositivo de la presente invención con la opción de contar con un cable de conexión (47) conectarse a una red de alimentación fija de 15 corriente alterna.

En la figura 12 el sistema de enfriamiento de la presente invención funciona a partir de la circulación de aire dentro de la carcasa (9), al colocar un miniventilador específicamente un "Raspberry Pi Cooling 20 Fan EasyCargo" (31, ver detalle B) dispuesto por debajo de la

20 Full Eucycargo (cF, Ver detaile E) alopactor per debajo de la computadora (1, ver figura 3B) que para esta invención es un ordenador de placa única (SBC por sus siglas en ingles) y específicamente un Raspberry Pi 4 Model B que es el componente que más se calienta y debe tener una temperatura adecuada para un 25 funcionamiento óptimo, de igual manera el miniventilador

Figura 51. Quincuagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente.

específicamente un "Raspberry Pi Cooling Fan EasyCargo" (31) está situado arriba de la ventila (43, ver figura 5) en la pared inferior para la entrada de aire frio del exterior y finalmente el aire sale por los orificios de ventilación (37) practicados en la pared posterior de la 5 carcasa (9).

De acuerdo con la figura 13 se ilustran las conexiones del cabezal extendido GPIO 40-Pin (23) con los demás componentes del dispositivo de la presente invención; en donde se muestran las 10 resistencias eléctricas (46) y los cables (47) conectados al cabezal extendido GPIO 40-Pin (23, ver figura 2) de Raspberry Pi 4 Model B (1) y a la placa PCB o placa de circuito impreso (32, ver figuras 3A y 3B).

- 15 De acuerdo con la figura 14 se muestra el diagrama eléctrico del cabezal extendido GPIO 40-Pin (23), el botón de encendido/Apagado (48), el dispositivo medidor de distancia (3) preferentemente un medidor de distancia láser Industrial Laser Distance Sensor B87Ab200416 JRT; el miniventilador específicamente un "Raspberry Pi
- 20 Cooling Fan EasyCargo" (31) que forma parte del sistema de enfriamiento o regulador de temperatura; la pantalla táctil (28), la serie Led (27) y el teclado de funciones principales (40).

De acuerdo con la figura 15 se muestran los botones del teclado de 25 funciones principales (40, ver figura 4B), que son el botón

Figura 52. Quincuagésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente.

"Iniciar/Pausar-medición" (49), el botón "Medición-Distancia" (50) el botón "Detener medición" (51), el botón "pantalla" (52), el botón "Encendido/Apagado" (48), un primer led (27a), un segundo led (27b) y un tercer led (27c).

5

Haciendo referencia a la figura 16, el dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo funciona de la siguiente manera:

a) El dispositivo debe estar en modo de suspensión;

10 b) Se determina si se han presionado el botón de encendido/apagado, si no se ha presionado entonces se entiende que el dispositivo sigue en modo de suspensión y si se ha presionado, entonces;

c) Se define el contador 1 y si el contador 1 es igual a contador

- 15 1+1 entonces;
 - d) Se determina si el contador 1 es un número impar, si no lo es entonces d1) se apaga la pantalla y el primer Led; pero si se cumple entonces;
 - e) El dispositivo se pone en funcionamiento en modo normal y se
- 20 enciende la pantalla y el primer led;
 - f) Se determina si hay una memoria USB en el puerto, si es así entonces f1) se guarda información en la memoria USB y f2) enseguida se expulsa la memoria USB;

g) Si en el paso de la inciso "f" no existe una memoria USB en el

25 puerto entonces el usuario selecciona el tipo, el tiempo y el

Figura 53. Quincuagésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente.

intervalo de captura de imágenes mediante la cámara;

- h) Enseguida aparece el mensaje (alinear el dispositivo y presionar el botón "medición de distancia");
- i) Se determina si se presiona el botón medición de distancia, si
- 5 se determina que si se presionó entonces se pasa al inciso "m"; pero si no se ha presionado entonces;
 - j) Se determina si se presiona el botón "detener medición", si se presiona entonces se retorna al punto del inciso "h" y si no se presiona entonces;
- 10 k) Se determina si se presiona el botón de encendido/apagado; si esto no sucede se retorna al punto del inciso "i"; peso si se ha presionado entonces;
 - El contador 1 es igual a contador 1+1 y se retorna al paso del inciso "d";
- 15 m) Medir la distancia entre la lente de la cámara y la superficie de interés, para posteriormente;
 - n) Guardar el valor de la distancia y consecuentemente;
 - o) Medir automáticamente la geometría del bulbo húmedo.
- 20 De acuerdo con la figura 17 el proceso de medición automática de la geometría del bulbo húmedo de conformidad con la presente invención consta de los siguientes etapas:
 - a) Medición automática de la geometría de bulbo húmedo;
 - b) Definir contador 2 y contador 3;
- 25 c) Iniciar cronómetro

Figura 54. Sexagésima hoja de la solicitud de registro de Patente.
d) Encender el segundo Led;

5

- e) Definir si se cumplió el tiempo de captura de imagen; si se cumplido el tiempo de captura de imagen entonces e1) se apaga el segundo Led y e2) se guarda la información de la geometría del bulbo húmedo y se finaliza;
- f) Si no se cumplió el tiempo de captura entonces se determina si se presiona el botón detener medición; si se presionó entonces
 f1) se apaga el segundo Led y f2) se guarda la información de

la geometría del bulbo húmedo y se finaliza;

- 10 g) Si no se presionó el botón detener medición, entonces se determina si se presionó el botón encendido/apagado; si se hizo entonces g1) se apaga el segundo Led y g2) se guarda la información de la geometría del bulbo húmedo y si g3) el contador 1 es igual a contador 1+1 entonces se finaliza;
- 15 h) Si no se presionó el botón encendido/apagado entonces se determina si se presionó el botón pantalla, si se ha presionado entonces h1) el contador 2 es igual al contador 2+1 y h2) se determina si el contador 2 es un número impar, si lo es entonces h3) se apaga la pantalla y si no lo es entonces h4) se enciende
- 20 la pantalla; ambas etapas "h3" y "h4" convergen en la siguiente etapa "i";
 - i) Se determina si se presionó el botón iniciar/pausar-medición, si no se hizo entonces;
 - j) Se captura y se guarda la imagen cuando se cumpla el intervalo
- 25 de tiempo definido y se pasa a la etapa del inciso "o";

Figura 55. Sexagésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente.

- k) Si se ha presionado el botón iniciar/pausar-medición entonces el contador 3 es igual al contador 3+1 y enseguida;
- Se determina si el contador 3 es un número impar, si no es entonces;
- 5 m) Se reactiva el cronómetro y se apaga el tercer Led;
 - n) Si el contador 3 sí es un número impar, entonces se pausa el cronómetro y se enciende el tercer Led y en ambas etapas "m" y "n" convergen a la etapa "j";
 - o) Leer la imagen;
- 10 p) Conversión RGB-HSV;
 - q) Extracción del bulbo húmedo: canal S y V;
 - r) Eliminación del ruido: abriendo y dilatando;
 - s) Obtención del perímetro de mojado: gradiente;
 - t) Eliminación del fondo: máscara;
- 15 u) Búsqueda y detección de los puntos extremos del bulbo húmedo;
 - v) Transformación distancia en pixeles a distancia real a partir de la variable "distancia";
 - w) Medición de la geometría del bulbo húmedo;
 - x) Guardar medición y mostrar resultados en pantalla y convergen
- 20 en la etapa del inciso "d"

MÉTODO DE MEDICIÓN

- 1) Instalación.
- 25 El primer paso para medir la geometría del bulbo húmedo en riego por

Figura 56. Sexagésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente.

goteo con la presente invención es la instalación del dispositivo de la presente invención en el sitio de medición.

1.1) Encendido del dispositivo de la presente invención.

Primero se tiene que conectar la fuente de alimentación ya sea 5 del tipo fija o portátil, después se presionara el botón "Encendido/Apagado" (48, ver figura 15) y se le dará algunos segundos para que encienda en modo normal, de igual manera el primer Led (27 a, ver figura 15) y la pantalla táctil (28 ver figura 4B) se encenderán. 1.2) Selección del tipo, el tiempo e intervalo de captura de las

10 imágenes.

En la pantalla táctil (28 ver figura 4B) el usuario tendrá que seleccionar las siguientes opciones:

Tipo de captura

a) ¿Medición en campo o en laboratorio?

15 Es necesario especificar si la medición en campo o en laboratorio ya que las condiciones de iluminación varían y por lo tanto el umbral óptimo es diferente (Visión por computadora). En las Figuras 18 y 19 se muestran el uso del dispositivo de la presente invención en campo y en laboratorio, respectivamente.

20

En la figura 18 se muestra el dispositivo de la presente invención montado en una columna (45) como sistema de soporte que posición el dispositivo de forma elevada sobre un surco (S) de una superficie donde se medirá la geometría de bulbo húmedo (gbh).

25

Figura 57. Sexagésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente.

En la figura 19 se muestra una perspectiva convencional del dispositivo de la presente invención instalado para medición en laboratorio en donde se requiere de un modelo físico de paredes transparentes (53) que debe contener un volumen de suelo o sustrato

- 5 (54) sobre el que se dispone un emisor de riego por goteo (55) conectado a un ducto (56) proveniente de una línea principal (57) donde se dispone un manómetro (58) para medición de presión y válvulas de control de paso (59) que emiten un volumen de agua desde una deposito o fuente de agua (60) con ayuda de una bomba de agua
- 10 (61), para dosificar agua a la superficie de la tierra contenida en dicho modelo físico de paredes transparentes (53) donde se genera un bulbo de humedad cuya geometría es medida por el dispositivo de la presente invención que se dispone frente a la superficie transparente para poder medir la geometría del bulbo húmedo (gbh) como ya se ha 15 descrito.

 b) ¿Medición directa en suelo o a través de un material transparente?
 Es necesario especificar esto ya que las condiciones de medición varían y por lo tanto el umbral óptimo es diferente (Visión por 20 computadora).

c) ¿Posición horizontal o vertical de medición?

Es necesario especificar esto si en la presente invención se utilizara un sistema digital de nivelación conectado a la computadora, pero en 25 este modelo de la presente invención es un sistema de nivelación

Figura 58. Sexagésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente.

físico de burbuja, no es de importancia definir esto.

d) ¿Primer riego o riego con humedad antecedente?

Es necesario especificar esta información ya que las condiciones de

5 color en el suelo varían si hay humedad previa y por lo tanto el umbral óptimo es diferente (Visión por computadora).

e) ¿Cuáles cuadrantes de la geometría del bulbo húmedo se requieren medir?

- 10 Es necesario especificar esta información ya que dependiendo del tipo de aplicación de la presente invención los cuadrantes de interés serán diferentes, por ejemplo, si el riego por goteo es superficial o subsuperficial, si la presente invención se colocó de manera horizontal o vertical, si en laboratorio se instaló el emisor de riego en
- 15 una esquina o en medio de una de las paredes del modelo físico de paredes transparentes, si en campo el perfil del suelo se particiono o no, etc.

Las opciones aparecerán en la pantalla táctil (28 ver figura 4B) y son

- 20 las mostradas en la figura 20 que ilustra las opciones a considerar de los cuadrantes de interés.
 - Tiempo e intervalo de captura

El tiempo e intervalo de captura de las imágenes se definirán con los 25 cronómetros que aparecerán en la pantalla táctil (28 ver figura 4B)

Figura 59. Sexagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente.

después de definir el tipo de captura, habiendo un cronómetro para el tiempo y otro cronómetro para el intervalo de captura.

1.3) Colocación y alineación del dispositivo de la presente invención5 en el sitio de medición.

El dispositivo se colocará cerca de la superficie de interés donde se requiera medir la geometría del bulbo húmedo, en la pantalla táctil (28 ver figura 4B) se observará la imagen que detecta la cámara, con esta información y el sistema de nivelación (11, ver figura 1) se alineará

 el dispositivo con respecto a la superficie de interés, con esto finaliza la instalación.

2) Mediciones y registro.

2.1) Medición de la distancia entre la cámara del dispositivo de la15 invención y la geometría del bulbo húmedo.

Se presionará el botón "Medición - Distancia" (50, ver figura 15) y se medirá la distancia de trabajo como se observa en la Figura 9. El dispositivo de la presente invención internamente hará la conversión de distancia en pixeles a distancia real de las imágenes capturadas a

- 20 partir del valor de distancia medido. Si se presionará el botón "Detener medición" (51, ver figura 15) el usuario regresará a la selección del tipo, tiempo e intervalo de captura de imágenes. Si se presionará el botón "Encendido/Apagado" (48, ver figura 15) la pantalla táctil (28 ver figura 4B) y el primer Led (27a, ver figura 15) se apagarían y el
- 25 dispositivo de la presente invención entraría a modo suspensión.

Figura 60. Sexagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.

2.2) Medición automática de la geometría del bulbo húmedo.

Después de medir la distancia entre la cámara (2) del dispositivo de la presente invención y la geometría del bulbo húmedo, se iniciará el parpadeo del segundo Led (27b, ver figura 15) y en la pantalla táctil

- 5 (28 ver figura 4B) se iniciará el cronometro de tiempo de medición, se tomaran capturas de imágenes cada vez que se cumpla el intervalo de tiempo establecido, hasta que se cumpla el tiempo establecido o se presione los botones "Detener medición" (51, ver figura 15) o "Encendido/Apagado" (48, ver figura 15), guardando la información
- 10 recabada hasta el momento en la memoria interna de la computadora(1) de la presente invención.

También existe la posibilidad de pausar la medición de la geometría del bulbo húmedo al presionar el botón "Iniciar/Pausar-medición" (49,

- 15 ver figura 15), se encenderá el tercer Led (27c, ver figura 15) cuando esté pausada la medición y se apagará cuando se vuelva a reactivar la medición al presionar de nuevo el botón "Iniciar/Pausar-medición" (49, ver figura 15). De igual manera se puede apagar y encender la pantalla táctil durante la medición al presionar el botón "pantalla" (52,
- 20 ver figura 15), se recomienda apagar la pantalla durante las mediciones cuando la fuente de alimentación es del tipo portátil para disminuir el consumo de energía y alargar la duración de funcionamiento de la presente invención.

25 Si se deja encendida la pantalla táctil (28 ver figura 4B), cada vez

Figura 61. Sexagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente.

que se realice una captura de imagen y la medición automática de la geometría del bulbo húmedo, esta irá apareciendo en la pantalla (28 ver figura 4B) y el usuario podrá verificar el correcto funcionamiento del dispositivo de la presente invención.

52

5

Al terminar la medición se apagará el segundo LED (27b, ver figura 15), se guardará la información y se regresará al usuario a la selección del tipo, tiempo e intervalo de captura de imágenes para realizar otra medición.

10

3) Descarga de la información y apagado de la invención.

Para descargar la información se utilizará una memoria USB y se tendrá que colocar en uno de los puertos USB, se reconocerá la memoria y en la pantalla se le preguntará al usuario si desea copiar

15 la información a la memoria USB y borrar la información de la memoria interna de la invención o solo copiar la información a la memoria USB.

En la memoria USB se descargará una carpeta con todas las imágenes capturadas, un archivo pgn con la geometría del bulbo húmedo y un

20 archivo x1xs con los avances máximos en los ejes "X" y "Y" como se ve en la figura 21. En la Figura 21 se ven los resultados obtenidos con el dispositivo de la presente invención en solo algunos unos minutos, siendo altamente superior la presente invención en comparación a los otros métodos que tardan días en obtener esta 25 misma información.

Figura 62. Sexagésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente.

El dispositivo de la presente invención expulsará la memoria USB automáticamente una vez que se haya copiado la información, el usuario podrá repetir los pasos anteriores para realizar una nueva medición o apagar el dispositivo de la presente invención, para apagar

- 5 la invención solo se tiene que presionar el botón de "Encendido/Apagado" (48, ver figura 15) y se apagara el primer LED (27a) y la pantalla táctil (28 ver figura 4B), el dispositivo de la invención entrara en modo suspensión, en ese momento se puede desconectar la fuente de alimentación.
- 10

4) Información adicional.

En la descarga de la información del dispositivo de la presente invención, de igual manera se podrá enviar la información al usuario vía correo electrónico, también se podrá utilizar los valores de los

15 avances máximos en los ejes "X" y "Y" en la automatización de procesos agrícolas a gran escala y en la toma de decisiones en tiempo real a partir del internet de las cosas (IoT). Para ello principalmente se tendrá que configurar el dispositivo de la presente invención antes de realizar las mediciones, tener acceso a internet y una cuenta en la

20 nube.

En las figuras 22 y 23 se observa parte del proceso que realiza el dispositivo de medición automática de la geometría del bulbo húmedo, con el fin de poder ejemplificar con mayor detalle lo realizado por la 25 presente invención en la detección y medición automática de la

Figura 63. Sexagésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente.

geometría del bulbo húmedo en riego por goteo.

Se considera que el invento ha sido descrito suficientemente como para que una persona con conocimientos medios en la materia pueda

5 reproducir y obtener los resultados que mencionamos en la presente invención.

Figura 64. Septuagésima hoja de la solicitud de registro de Patente.

55 REIVINDICACIONES

Habiendo descrito suficientemente la invención, se reclama como propiedad lo contenido en las siguientes cláusulas reivindicatorias.

5

1.- Un dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo caracterizado por comprender una computadora configurada para conectarse con al menos una cámara digital o térmica configurada para enfocar y tomar imágenes del bulbo

- 10 húmedo en una superficie de suelo; con un dispositivo medidor de distancia para obtener una distancia desde la parte frontal del lente de la cámara que toma las imágenes del bulbo húmedo hasta la superficie de suelo donde se encuentra el bulbo húmedo y usarse para calcular la geometría del bulbo húmedo; un sistema de enfriamiento o
- 15 regulador de temperatura controlado por dicha computadora para hacer circular aire de enfriamiento dentro del dispositivo; un sistema de interfase persona-máquina para la interacción entre el usuario y el dispositivo; un sistema de comunicación de información del dispositivo vía física o internet desde la computadora hacia los usuario y un
- 20 carcasa donde se alojan dichos componentes, con un sistema de soporte y nivelación y una fuente de alimentación de energía para la computadora y que proporciona energía a través de la computadora a la cámara, al dispositivo medidor de distancia, al sistema de enfriamiento o regulador de temperatura y al sistema de interface
- 25 persona-máquina.

Figura 65. Septuagésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente.

2.- El dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque dicha al menos una cámara digital o térmica se calibra a partir de los coeficientes de distorsión y los parámetros
 5 intrínsecos y extrínsecos de la propia cámara, definidos por la matriz

específica de la misma.

3.- El dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de acuerdo con la reivindicación 1,

- 10 caracterizado porque dicha computadora se selecciona del grupo que consta de una computadora comercial o armada por componentes, un ordenador de placa reducida o también conocido como ordenador de placa única o una unidad central de procesamiento con solo algunos componentes periféricos.
- 15

4.- El dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque dicha computadora es un ordenador de placa única seleccionado de Arduino, ECB AT9, Gumstix, Raspberry Pi,
20 Orange Pi o NVIDIA Jetson Nano.

5.- El dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque dicha computadora es un ordenador de placa
25 única, específicamente un Raspberry Pi 4 Modelo B.

Figura 66. Septuagésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente.

6.- El dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque dicha al menos una cámara digital o térmica es una cámara compatible con puertos USB o CSI o al cabezal GPIO de
5 Raspberry Pi 4 Model B, estas pueden ser multiobjetivo o compactas.

57

 7.- El dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque dicha al menos una cámara digital o térmica es
 10 una cámara Raspberry Pi Camera Module 2, con una carcasa plástica.

8.- El dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque dicho dispositivo medidor de distancia se
15 selecciona de medidores de distancias láser o sónicos, compatibles con Raspberry Pi 4 Model B, o una segunda cámara que mediante "visión estereoscópica" permite medir la profundidad o distancia entre las cámaras y la superficie de interés.

20 9.- El dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque dicho dispositivo medidor de distancia es un sensor de distancia Industrial Laser Distance Sensor B87A-b200416 JRT o un sensor láser de sistema 2-D de localización.

25

Figura 67. Septuagésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente.

10.- El dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque dicha fuente de alimentación de energía para dicha computadora se selecciona de cualquier cargador compatible

- 5 con Raspberry Pi 4 Model B que cumpla con 5 voltios y 3 amperaje de corriente directa, paneles solares, baterías de plomo y acido, baterías portátiles o banco de baterías, adaptadores con baterías de litio o alcalinas, etc.
- 10 11.- El dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque dicho sistema de interfase persona-máquina para la interacción entre el usuario y el dispositivo se seleccionan de monitores, pantallas, teclados, sensores, series led, potenciómetros,
- 15 prolongadores para cables USB, Ethernet, interruptores, resistencias eléctricas, placas PCB o placas de circuito impreso, cables, entre otros o combinaciones de los mismos.

12.- El dispositivo para medir con visión artificial la geometría del 20 bulbo húmedo en riego por goteo, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque dicho sistema de enfriamiento o regulador de temperatura se selecciona de ventiladores individuales, sensores de temperatura conectados a ventiladores, sistemas de regulación de temperatura para computadoras, o sus combinaciones.

25

Figura 68. Septuagésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente.

13.- El dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque dicho sistema de soporte y nivelación del dispositivo se selecciona de trípodes, estabilizadores, brazos
5 mecánicos, configurados para ubicar el dispositivo a distintas alturas y ángulos de toma.

59

14.- El dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, de acuerdo con la reivindicación 13,

- 10 caracterizado porque dicho sistema de soporte y nivelación del dispositivo está configurado y adaptado para montarse a un vehículo tripulado o no tripulado, como lo son drones, vehículos terrestres, rieles de inducción magnética, robots, entre otros.
- 15 15.- Un método para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, caracterizado porque consiste en:

Obtener imágenes de bulbo húmedo de una superficie de riego por goteo mediante al menos una cámara digital o térmica previamente calibrada;

- 20 Determinar la distancia existente entre la parte frontal del lente de la cámara que toma las imágenes del bulbo húmedo hasta la superficie de suelo donde se encuentra el bulbo húmedo a través de un dispositivo medidor de distancia, para usarse en el cálculo y determinación de la geometría del bulbo húmedo;
- 25 Procesar las imágenes obtenidas del bulbo húmedo mediante

Figura 69. Septuagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente.

conversión entre los espacios de color RGB a HSV;

Eliminación de ruido de las imágenes mediante procesos de binarización y umbralización para definir el primer plano de interés de la geometría del bulbo húmedo, y obtener el perímetro o gradiente de

5 mojado, eliminando el fondo de las imágenes obtenidas;

Buscar y detectar los puntos extremos del bulbo húmedo y transformar la distancia medida en pixeles a distancia real;

Medir la geometría del bulbo húmedo

10

Figura 70. Septuagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.

61 R E S U M E N

La invención se refiere a un dispositivo para medir con visión artificial la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo caracterizado por 5 comprender una computadora configurada para conectarse con al menos una cámara digital o térmica configurada para enfocar y tomar imágenes del bulbo húmedo en una superficie de suelo; con un dispositivo medidor de distancia para obtener una distancia desde la parte frontal del lente de la cámara que toma las imágenes del bulbo

- 10 húmedo hasta la superficie de suelo donde se encuentra el bulbo húmedo y usarse para calcular la geometría del bulbo húmedo; un sistema de enfriamiento o regulador de temperatura controlado por dicha computadora para hacer circular aire de enfriamiento dentro del dispositivo; un sistema de interfase persona-máquina para la
- 15 interacción entre el usuario y el dispositivo; un sistema de comunicación de información del dispositivo vía física o internet desde la computadora hacia los usuario y un carcasa donde se alojan dichos componentes, con un sistema de soporte y nivelación y una fuente de alimentación de energía para la computadora y que proporciona
- 20 energía a través de la computadora a la cámara, al dispositivo medidor de distancia, al sistema de enfriamiento o regulador de temperatura y al sistema de interface persona-máquina.

25

Figura 71. Septuagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente.



FIG.1



Figura 72. Septuagésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente.



MX/a/2022/012646

Figura 73. Septuagésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente.





FIG. 5

Figura 74. Octagésima hoja de la solicitud de registro de Patente.





FIG. 6A





FIG. 7A

Figura 75. Octagésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente.



FIG. 8



Figura 76. Octagésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente.



FIG. 10



FIG. 11

Figura 77. Octagésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente.







Figura 78. Octagésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente.



FIG. 14



Figura 79. Octagésimo quinta hoja de la solicitud de registro de Patente.



Figura 80. Octagésimo sexta hoja de la solicitud de registro de Patente.



Figura 81. Octagésimo séptima hoja de la solicitud de registro de Patente.



FIG. 18



Figura 82. Octagésimo octava hoja de la solicitud de registro de Patente.



MX/a/2022/012646

Figura 83. Octagésimo novena hoja de la solicitud de registro de Patente.



FIG. 21



FIG. 22





FIG. 23

Figura 85. Nonagésimo primera hoja de la solicitud de registro de Patente.

CONTRATO DE CESIÓN DE DERECHOS DE INVENCIÓN.

CONTRATO DE CESIÓN DE DERECHOS DE INVENCIÓN QUE CELEBRAN, POR UNA PARTE, LOS C. DR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ, DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ, DR. DAVID CRISTÓBAL ACEVEDO, PROFESORES INVESTIGADORES DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO Y EL ALUMNO, ING. IROURI CRISTÓBAL MUÑOZ DEL POSGRADO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA; A QUIEN EN LO SUCESIVO SE LES DENOMINARÁN "LOS CEDENTES", Y POR LA OTRA PARTE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO A QUIEN EN LO SUCESIVO SE

DECLARACIONES

LE DENOMINARÁ COMO "LA CESIONARIA", AL TENOR DE LAS SIGUIENTES DECLARACIONES Y

I. Declaran "LOS CEDENTES":

CLÁUSULAS:

I.1 Ser mexicanos, mayores de edad y estar en pleno uso y goce de sus facultades y derechos;

I.2 Comparecer a la firma del presente documento sin que medie dolo o vicio alguno del consentimiento.

I.3 Haber desarrollado la invención materia del presente contrato, el cual consiste en el s reconocimiento ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial de la Patente denominada: DISPOSITIVO Y MÉTODO PARA MEDIR CON VISIÓN ARTIFICIAL LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO.

II. Declara "LA CESIONARIA":

II.1 Ser una INSTITUCIÓN EDUCATIVA MEXICANA con reconocimiento nacional e internacional con alta calidad académica en educación, con servicios y transferencia de las innovaciones e investigación científica y tecnológica que realiza; constituida de conformidad a las leyes de la República Mexicana, y contemplar dentro de su objeto la celebración de acuerdos de la naturaleza y tipo del presente.

II.2 Estar representada en este acto por el Lic. Juan Luis Moreno Arellano, en su calidad de apoderado legal, facultades que a la fecha no le han sido revocadas o limitadas en forma alguna, de conformidad con la escritura pública número cuarenta y siete mil setecientos cincuenta y uno del volumen novecientos once, otorgado ante la Fe del Lic. Juan Carlos Palafox Villalva, Notario Público No. 16 en la ciudad de Texcoco, Estado de México, a los veinte días del mes de diciembre de dos mil diecinueve.

III. CLÁUSULAS:

III.1 Dr. Jorge Víctor Prado Hernández, por mi derecho, en pleno uso de mis facultades y por así convenir a mis intereses, cedo, transfiero y asigno a la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, con domicilio en Km. 38.5 Carretera México-Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de

Página 1 de 3

Figura 86. Nonagésimo segunda hoja de la solicitud de registro de Patente.

157

CONTRATO DE CESIÓN DE DERECHOS DE INVENCIÓN

México C.P. 56230, el 100% de los derechos, títulos, intereses y privilegios respecto a la invención arriba señalada, con base a lo dispuesto en el artículo 163 de la Ley Federal de Trabajo. Reservándome derecho o acción alguna presente o futura de ejercitar en contra de ésta, por la cesión que se indica.

III.2 Dr. Noé Velázquez López, por mi derecho, en pleno uso de mis facultades y por así convenir a mis intereses, cedo, transfiero y asigno a la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, con domicilio en Km. 38.5 Carretera México-Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de México C.P. 56230, el 100% de los derechos, títulos, intereses y privilegios respecto a la invención arriba señalada, con base a lo dispuesto en el artículo 163 de la Ley Federal de Trabajo. Reservándome derecho o acción alguna presente o futura de ejercitar en contra de ésta, por la cesión que se indica.

III.3 Dr. David Cristóbal Acevedo, por mi derecho, en pleno uso de mis facultades y por así convenir a mis intereses, cedo, transfiero y asigno a la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, con domicilio en Km. 38.5 Carretera México-Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de México C.P. 56230, el 100% de los derechos, títulos, intereses y privilegios respecto a la invención arriba señalada, con base a lo dispuesto en el artículo 163 de la Ley Federal de Trabajo. Reservándome derecho o acción alguna presente o futura de ejercitar en contra de ésta, por la cesión que se indica.

III.4 Alum. Ing. Irouri Cristóbal Muñoz, por mi derecho, en pleno uso de mis facultades y por así convenir a mis intereses, cedo, transfiero y asigno a la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO el 100% de los derechos, títulos, intereses y privilegios respecto de la invención arriba señalada. Reservándome derecho o acción alguna presente o futura de ejercitar en contra de ésta, por la cesión que se indica.

III.5 La CESIONARIA acepta esta cesión en los términos y clausulas establecidas.

III.6 La CESIONARIA reconoce el derecho irrenunciable de los inventores, señalándolos en la solicitud de Patente, para ser mencionados con el reconocimiento que corresponda, conforme a lo dispuesto en los Artículos 39 y 40 de Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial.

Se firma la presente en dos ejemplares, a los cinco días del mes de octubre del año dos mil veintidós, en Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

Departamento de Suelos UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO EL CEDENTE

Dr. Noe Velázquez López Profesor Investigador Departamento de Irrigación UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO EL CEDENTE

Página 2 de 3

Figura 87. Nonagésimo tercera hoja de la solicitud de registro de Patente.





MX/a/2022/012646

CONTRATO DE CESIÓN DE DERECHOS DE INVENCIÓN.

Dr. David Cristóbal-Acevedo Profesor Investigador Departamento de Suelos UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO EL CEDENTE

Lic. Juan Luk Moreno Arellano Apoderado Legal UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO LA CESIONARIA

Lic Paola Carolina Fernández Reyes Dirección General de Investigación y Posgrado UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO TESTIGO

en Elle

Ing. Irouri Cristóbal Muñoz

Alumno. Posgrado de Ingeniería Agrícola y

Uso Integral Del Agua

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

EL CEDENTE

Ing. César Botello Aguillón Dirección General de Investigación y Posgrado UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO TESTIGO

Página 3 de 3

Figura 88. Nonagésimo cuarta hoja de la solicitud de registro de Patente.