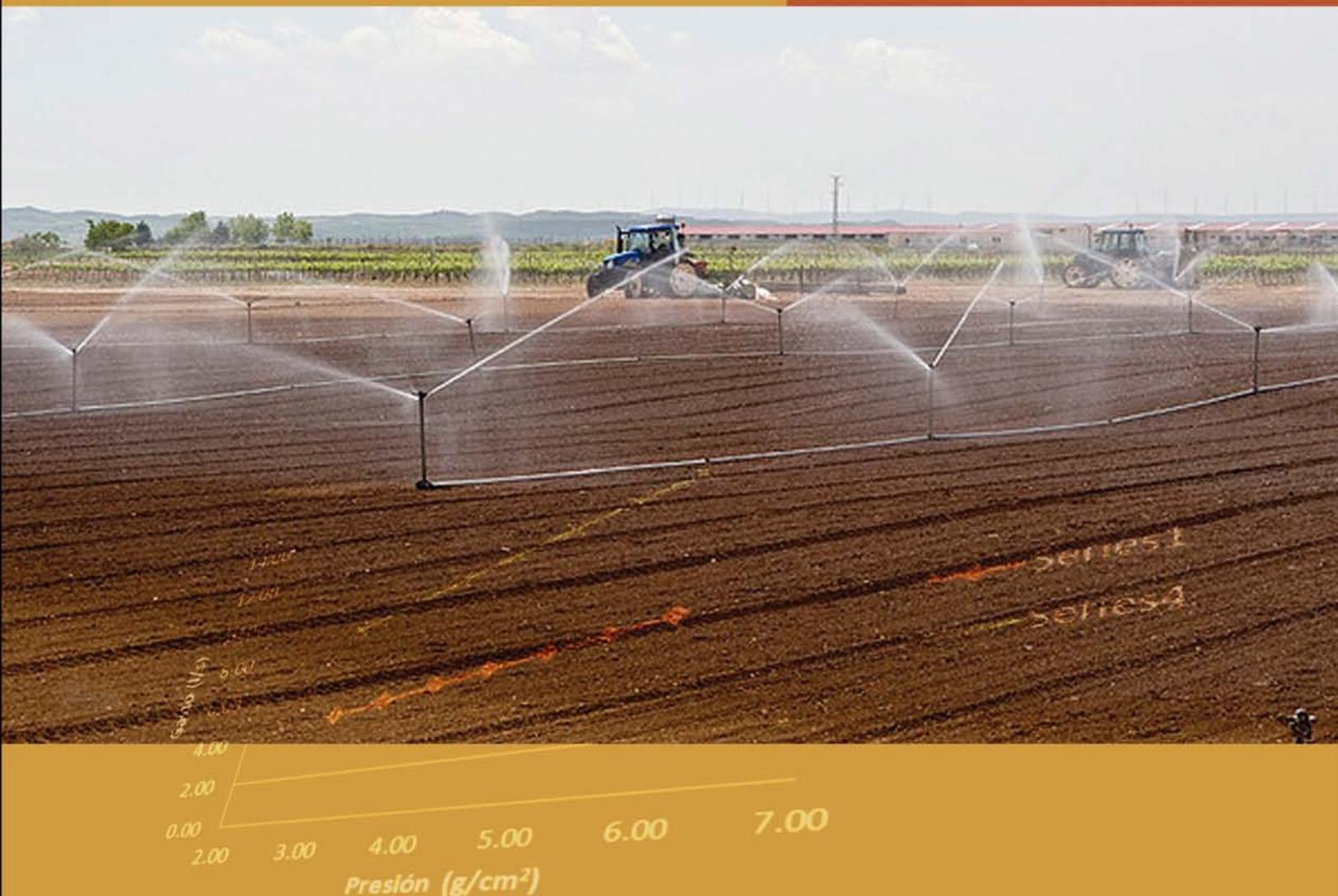


EL RIEGO POR ASPERSIÓN

ENFOQUES AGRONÓMICO, ESTADÍSTICO, HIDRÁULICO Y ECONÓMICO

EFREN PEÑA



EL RIEGO POR ASPERSIÓN

Enfoques agronómico,
estadístico, hidráulico y
económico

EL RIEGO POR ASPERSIÓN

Enfoques agronómico, estadístico,
hidráulico y económico

Efrén Peña Peña

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

2012

631.587 Peña Peña, Efrén
P56 *Riego por aspersión: enfoques agronómicos, estadístico, hidráulico y económico / Efrén Peña Peña.. -- Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2012.*

180 p.
ISBN

1. Riego por aspersión 2. Agronomía 3. Hidráulica 4. Análisis estadístico 5. Aspectos económicos

Coordinación editorial:
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Coordinación de Comunicación,
Participación e Información.

Subcoordinación de Vinculación, Comercialización
y Servicios Editoriales.

Primera edición impresa: 2012.

D.R. © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
62550 Progreso, Jiutepec, Morelos
MÉXICO
www.imta.gob.mx

ISBN
Impreso en México – Printed in Mexico

PRÓLOGO

Con la finalidad de promover tecnología para el mejoramiento el uso del agua con los sistemas de riego por aspersión, en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua se preparó el presente libro para divulgar conocimientos aplicados al uso y manejo de este tipo de riego. En él se tratan aspectos básicos sobre:

Las relaciones que existen entre el suelo, el agua y el método de riego por aspersión;

La estadística aplicada al riego por aspersión;

Los sistemas de riego por aspersión y sus componentes;

El funcionamiento hidráulico de sistemas de riego por aspersión;

Las evaluaciones agronómica, hidráulica y económica, y una propuesta para mejorar los sistemas de riego por aspersión y su operación.

Se tratan aspectos básicos del riego por aspersión, con la finalidad de dar a conocer la adaptabilidad de los sistemas de riego a los suelos y a los cultivos, su funcionamiento hidráulico, tanto de los aspersores como de las tuberías regantes de salidas múltiples, la forma de evaluarlos y de mejorarlos en su operación o en los componentes que integran el sistema. La evaluación de los sistemas de riego por aspersión incluye las fases de planear, desarrollar, analizar los resultados y hacer recomendaciones sobre el mejoramiento de la operación de los equipos.

De igual forma, se propone un procedimiento para describir el comportamiento de un sistema de riego por aspersión con un parámetro de eficiencia global que integra la eficiencia y la uniformidad, y se muestra la aplicación de los parámetros estadísticos para analizar la uniformidad de lluvia y el parámetro correspondiente a la eficiencia de distribución hidráulica.

También, se hace una aportación sobre la forma de utilizar los resultados de las evaluaciones de sistemas de riego por aspersión en la operación, que consiste en un procedimiento, lógico y analítico, para calcular las láminas de riego que deben aplicarse a un cultivo para regar sin déficits y con la mejor eficiencia global posible.

El libro permitirá dar mayor conocimiento y divulgación a los principios del riego por aspersión en las escuelas técnicas y en las universidades, y podrá servir de apoyo a los técnicos que quieren usar bien el riego por aspersión.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1

DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN.	21
1.1. Antecedentes	21
1.1.1. Eficiencias global y parciales de riego.	21
1.1.2. Eficiencia en riego por aspersión	22
1.1.3. Uniformidad de distribución en riego por aspersión	27
1.2. Método propuesto para calcular la eficiencia global de sistemas de riego por aspersión	29
1.2.1. Eficiencia, uniformidad y pérdidas de agua en el sistema de riego	29
1.2.2. Evaluaciones agronómica e hidráulica	30
1.2.3. Evaluación económica	30
1.2.4. Conocimientos necesarios para la evaluación de los sistemas de riego por aspersión	30

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS AGRONÓMICOS DE RIEGO POR ASPERSIÓN	33
2.1. Relaciones agua-suelo-riego por aspersión.	33
2.1.1. Almacenamiento de agua en el suelo.	33
2.1.1.1. Suelo saturado	33
2.1.1.2. Suelo a capacidad de campo	34
2.1.1.3. Suelo a marchitamiento permanente	35
2.1.1.4. Aireación dentro del suelo	36
2.1.2. Disponibilidad del agua	37
2.1.2.1. Humedad aprovechable total.	37
2.1.2.2. Humedad fácilmente aprovechable	38
2.1.3. Movimiento del agua en el suelo	39
2.1.3.1. Infiltración del agua en el suelo en riego por aspersión.	39
2.1.3.2. Infiltración acumulada	39
2.1.3.3. Velocidad de infiltración	40
2.1.4. Lámina de riego en aspersión	42
2.1.4.1. Lámina de agua	42
2.1.4.2. Lámina de agua aprovechable en los suelos	42
2.1.4.3. Láminas de riego neta y bruta.	43
2.1.5. Aspersión y salinidad	44
2.1.6. Requerimiento de riego	47
2.1.7. Aportaciones del manto freático.	48

CAPÍTULO 3	
ESTADÍSTICA APLICADA AL RIEGO POR ASPERSIÓN	51
3.1. Población, individuo y muestra	51
3.1.1. Población	51
3.1.2. Individuo	51
3.1.3. Muestra	51
3.2. Medida de tendencia central	51
3.2.1. Media 51	
3.2.2. Media ponderada	52
3.2.3. Mediana	53
3.2.4. Moda 53	
3.3. Medidas de dispersión.	53
3.3.1. Rango 53	
3.3.2. Varianza	54
3.3.3. Desviación típica o estándar	55
3.3.4. Coeficiente de variación	55
3.4. Distribución de frecuencias	55
3.4.1. Distribución de frecuencias simétrica	57
3.4.2. Distribución de frecuencias asimétrica	58
3.5. Ejemplos de estadística aplicada en aspersión	58
3.5.1. Ejemplo 1. Análisis estadístico de la lluvia de un aspersor operando individualmente y con traslapes de lluvia, generados con la precipitación del mismo aspersor.	58
3.5.2. Ejemplo 2. Estudio estadístico de lluvia generada por una línea de aspersores	61
3.6. Muestreo	66
3.6.1. Objetivo del muestreo.	66
3.6.2. Tamaño de muestra	67
3.6.3. Consideraciones generales	67
 CAPÍTULO 4	
COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN.	
69	
4.1. Aspersores	69
4.1.1. Aspersores pequeños	69
4.1.2. Aspersores estándar.	70
4.1.3. Aspersores gigantes.	71
4.2. Tuberías 73	
4.2.1. Tuberías regantes	73
4.2.2. Tuberías de conducción y distribución	74
4.3. Sección de riego	74
4.4. Equipos y accesorios hidráulicos	75
4.4.1. Válvulas	75
4.4.1.1. Válvula de retención.	75
4.4.1.2. Válvula de alivio de presión	75
4.4.1.3. Válvulas de control	76

4.4.1.4. Válvulas de admisión y expulsión de aire	76
4.4.2. Medidores de gasto hidráulico.	77
4.4.2.1. Medidores de presión diferencial	78
4.4.2.2. Medidores de gasto de placa de orificio.	78
4.4.2.3. Medidores de gasto de propela y turbina.	78
4.4.3. Medidor de presión	78
4.5. Sistema de bombeo	79
4.5.1. Unidad de bombeo	79
4.5.2. Subestación eléctrica	80
4.5.3. Obra de toma	81

CAPÍTULO 5

LOS SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN	83
5.1. Sistemas fijos.	83
5.2. Sistemas semifijos	84
5.3. Sistemas móviles.	84
5.3.1. Sistemas portátiles de movimiento intermitente	84
5.3.1.1. Sistemas portátiles de movimiento manual.	85
5.3.1.2. Sistemas portátiles de movimiento mecánico	86
5.3.2. Sistemas de movimiento continuo.	88
5.3.2.1. Cañón viajero	88
5.3.2.2. Regante de pivote central.	89
5.3.2.3. Tubería regante de movimiento frontal o avance frontal	90

CAPÍTULO 6

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN	93
6.1. Evaluación agronómica.	93
6.1.1. Productividad del agua	93
6.1.2. Eficiencia global del sistema de riego	95
6.1.3. Eficiencias parciales.	96
6.1.3.1. Eficiencia de almacenamiento	96
6.1.3.2. Eficiencia de conducción	97
6.1.3.3. Eficiencia de aplicación	97
6.1.3.4. Tipos de expresiones de las eficiencias usadas en riego	98
6.1.4. Pérdidas de agua en el riego por aspersión.	99
6.1.4.1. Pérdidas por grado de uniformidad de lluvia	100
6.1.4.2. Pérdidas por arrastre y evaporación.	100
6.1.4.3. Pérdidas por grado de uniformidad de distribución hidráulica	101
6.1.4.4. Pérdidas en la conducción	101
6.1.4.5. Pérdidas en el vaso	101
6.2. Evaluación hidráulica.	102
6.2.1. Bases de hidráulica para lograr la uniformidad	102
6.2.1.1. Presiones y gastos de operación del sistema	102

6.2.1.2. Rango de gasto o presión de operación de aspersores.	103
6.2.1.3. Análisis del funcionamiento de una tubería con aspersores	106
6.2.2. Evaluación de los sistemas de riego.	112
6.2.2.1. Factores que afectan la uniformidad de riego del sistema	112
6.2.2.2. Evaluación del sistema con presiones y gastos de operación	113
6.2.2.3. Evaluación de la uniformidad de distribución hidráulica del sistema (UDH) o eficiencia de distribución hidráulica	116
6.2.2.4. Evaluación de la uniformidad de la lluvia	119
6.2.2.5. Evaluación global de la eficiencia	125
6.3. Evaluación económica	131
6.3.1. Costos del sistema de riego.	132
6.3.2. Costos del cultivo, valor de la cosecha y relación beneficio-costo	134
6.4. Procedimiento para evaluar un sistema de riego	136
6.4.1. Proceso de evaluación	136
6.4.2. Planeación de una evaluación	136
6.4.3. Requerimientos generales para conocer el grado de desempeño.	137
6.4.4. Objetivos y requisitos generales	138
6.4.5. Evaluación de campo	138
6.4.6. Dispositivos y materiales para la evaluación.	139
6.4.7. Organización de la visita	140
6.4.8. Realizando una evaluación.	141
6.4.9. Analizando datos de una evaluación	142
6.4.10. Preparando el reporte de una evaluación	142
6.5. Recomendaciones para el mejoramiento De sistemas de riego por aspersión.	143
6.5.1. Bases de operación de un sistema de riego por aspersión.	143
6.5.2. Indicadores de desempeño y acciones de mejora de un sistema de riego por aspersión.	143
6.5.3. Recomendaciones generales de operación de un sistema de riego por aspersión	144
 CAPÍTULO 7	
EJEMPLOS DE EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO	147
7.1. Ejemplo de evaluación agronómica en riego por aspersión tipo pivote	147
7.1.1. Información obtenida sobre el cultivo de caña	147
7.1.2. Productividad del suelo y del agua en el cultivo de caña	148
7.1.3. Cálculo de la evapotranspiración de referencia de la zona.	149
7.1.4. Requerimiento de riego, tomando en cuenta la evapotranspiración del cultivo y la lluvia efectiva.	150

7.1.5. Requerimiento de riego tomando en cuenta la salinidad.	150
7.1.6. Ajuste de requerimiento de riego por aportación de manto freático	152
7.1.7. Eficiencias de riego.	153
7.1.8. Pérdidas de agua.	153
7.1.9. Recomendaciones.	154
7.2. Ejemplo de evaluación hidráulica	
<i>De un sistema de riego de pivote central.</i>	154
7.2.1. Decisión y objetivos de la evaluación	154
7.2.2. Planeación de la evaluación	154
7.2.3. Obtención de la información del predio	155
7.2.4. Análisis de documentos e información	156
7.2.5. Visita preliminar.	156
7.2.6. Definición de parámetros de la evaluación	156
7.2.7. Prueba de uniformidad de lluvia	157
7.2.8. Recomendaciones	162
7.3. Ejemplo de evaluación de un sistema de riego	
<i>por aspersión portátil manual</i>	163
7.3.1. Decisión y objetivos de la evaluación	163
7.3.2. Planeación de la evaluación	163
7.3.3. Obtención de la información del predio	163
7.3.4. Análisis de documentos e información	164
7.3.5. Visita preliminar.	165
7.3.6. Definición de parámetros de la evaluación	165
7.3.7. Trabajos desarrollados.	165
7.3.7.1. Prueba de uniformidad de lluvia	165
7.3.7.2. Prueba de uniformidad de distribución hidráulica	169
7.3.7.3. Pérdidas por arrastre y evaporación	171
7.3.7.4. Análisis de la información de los trabajos de campo	172
7.3.7.5. Análisis de simulación de riego con traslape mejorado (9*9).	173
7.3.7.6. Recomendaciones de mejora de acuerdo con la evaluación del sistema de riego	174
7.4. Ejemplo de cálculo de lámina de riego con datos	
<i>de una evaluación en sistema de riego portátil manual.</i>	176
7.4.1. Información recabada.	176
7.4.2. Resultados de la evaluación.	176
7.4.3. Cálculos y jerarquización de problemas.	176
7.4.4. Recomendaciones.	177
8 REFERENCIAS	179

CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Diagrama de distribución del agua en riego por aspersión presentado por Tarjuelo, 1995..	23
--	----

CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Suelo saturado.	34
Figura 2.2. Suelo con contenido de humedad a capacidad de campo.	35
Figura 2.3. Suelo con porcentaje de humedad a marchitamiento permanente.	36
Figura 2.4. Suelo con humedad higroscópica.	36
Figura 2.5. Curvas de retención de humedad de suelos.	38
Figura 2.6. Curvas de infiltración acumulada del agua en suelos ligeros..	39
Figura 2.7. Curva de velocidad de infiltración del agua en suelo franco arcillo arenoso.	40
Figura 2.8. Curva de velocidad de infiltración del agua en suelo franco.	41
Figura 2.9. Relación de salinidad y producción de los cultivos.	46
Figura 2.10. Aportación de agua del manto freático a la zona de las raíces por flujo capilar. Gráfica adaptada de Doorenbos y Pruitt, 1977.	49

CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Distribuciones de frecuencias simétricas y asimétricas.	56
Figura 3.2. Distribución de la lluvia de un aspersor, funcionando individualmente y sin viento.	59
Figura 3.3. Perfil de la distribución de la lluvia de 16 aspersores, funcionando sin viento, en cuadro de 4 * 4 aspersores.	60
Figura 3.4. Distribución de la lluvia de 16 aspersores, funcionando sin viento, en cuadro de 4 * 4 aspersores sin la lluvia de las orillas.	62
Figura 3.5. Distribución en campo de los recipientes o pluviómetros.	62
Figura 3.6. Distribución de la lluvia de una línea de aspersores, muestreando el área de influencia equivalente de un aspersor. Perspectiva.	63
Figura 3.7. Volúmenes captados considerando traslapes, incluyendo cinco posiciones de aspersores sobre la tubería regante y cinco posiciones de tuberías regantes. Vista en dirección de las tuberías regantes.	63

Figura 3.8. Volúmenes captados considerando traslapes, incluyendo cinco posiciones de aspersores sobre la tubería regante y cinco posiciones de tuberías regantes. Sin considerar las orillas.	64
--	----

CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Aspersores pequeños.	69
Figura 4.2. Aspersor de impacto con dos boquillas.	70
Figura 4.3. Curvas presión-gasto en el rango recomendado de operación, para un aspersor estándar utilizando diferentes boquillas.	70
Figura 4.4. Curvas presión-radio en el rango recomendado de operación, para un aspersor estándar utilizando diferentes boquillas.	71
Figura 4.5. Aspersor gigante o cañón.	72
Figura 4.6. Curvas características de aspersores gigantes.	72
Figura 4.7. Curvas presión-radio de un aspersor gigante en el rango de operación normal.	72
Figura 4.8. Tubería regante en aspersión.	73
Figura 4.9. Integración de válvula de alivio de presión, con válvula de admisión y expulsión de aire, en las funciones de seguridad.	76
Figura 4.10. Válvula de admisión y expulsión de aire en conducciones presurizadas.	76
Figura 4.11. Exactitud en el campo de medición.	77
Figura 4.12. Medidor de propela para tuberías.	78
Figura 4.13. Manómetros con glicerina (reductora de vibraciones).	79
Figura 4.14. Motobomba centrífuga diesel remolcable.	80
Figura 4.15. Cárcamo rectangular y planta de bombeo con bombas de turbina vertical.	80
Figura 4.16. Subestación eléctrica.	81
Figura 4.17. Obra de toma con rejilla y trampa de azolves.	81

CAPÍTULO 5

Figura 5.1. Sistema de riego por aspersión permanente.	83
Figura 5.2. Sistemas de aspersión semifija para siembra de hortalizas.	84
Figura 5.3. Equipos de bombeo de sistemas de riego por aspersión portátil preparado como remolque para transportarse con tractor.	84
Figura 5.4. Sistema de riego por aspersión portátil manual de varias tuberías regantes operando simultáneamente.	85
Figura 5.5. Sistema de riego por aspersión portátil manual con distribuidor y regantes.	85
Figura 5.6. Tubería regante de un sistema de riego por aspersión portátil manual con elevadores.	86
Figura 5.7. Aspersor gigante de un sistema de riego por aspersión portátil manual con su elevador.	86
Figura 5.8. Motor y sistema de tracción para generar el avance de la tubería regante, rodando sobre su propio eje.	87
Figura 5.9. Aspersor con contrapeso conectado a la tubería rodante en posición incorrecta de riego.	87

Figura 5.10. Aspersor con contrapeso conectado al final de la tubería rodante en posición correcta de riego.	88
Figura 5.11. Aspersor de cañón viajero.	88
Figura 5.12. Enrollador de cañón viajero.	89
Figura 5.13. Trazo de riego de un cañón viajero.	89
Figura 5.14. Sistemas de riego con pivote central para permitir el giro de la tubería regante.	90
Figura 5.15. Tanque de almacenamiento de la descarga de un equipo de bombeo de pozo profundo, para el riego de una tubería regante de avance frontal.	91
Figura 5.16. Hidrante para el riego de una tubería regante de avance frontal.	91
Figura 5.17. Microaspersor y tubería regante de avance frontal.	91

CAPÍTULO 6

Figura 6.1. Relación entre gastos y presiones de emisores con la eficiencia de distribución hidráulica que generan, en una tubería operando a nivel.	105
Figura 6.2. Gastos de los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante.	107
Figura 6.3. Láminas aplicadas por los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante y los incrementos cada 10%.	109
Figura 6.4. Láminas brutas aplicadas por los aspersores de acuerdo con su posición en la tubería regante, lámina bruta media, lámina neta, lámina de proyecto y con rango de 10%.	110
Figura 6.5. Láminas brutas aplicadas por los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante, lámina bruta media, lámina neta, lámina de proyecto y con rango de 20%.	110
Figura 6.6. Láminas brutas aplicadas por los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante, lámina bruta media, lámina neta, lámina de proyecto y con rango de 30%.	111
Figura 6.7. Láminas brutas aplicadas por los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante, lámina bruta media, lámina neta, lámina de proyecto y con rango de 40%.	111
Figura 6.8. Elección de los emisores o sitios de muestreo en una subunidad o sección de riego.	119
Figura 6.9. Uniformidad del riego de una tubería de aspersores, sin y con traslapes entre tuberías.	125
Figura 6. 10. Factor de recuperación de capital.	132

CAPÍTULO 7

Figura 7.1. Reducción de la producción del cultivo de caña, en relación al aumento de la salinidad
--

en la solución del suelo (extracto a saturación del suelo)..	151
Figura 7.2. Contribución de las aguas subterráneas a la rizósfera en mm/día.	152
Figura 7.3. Línea de puntos para ubicación de los pluviómetros, para la prueba de aspersión.. . . .	157
Figura 7.4. Láminas precipitadas por revolución de 36 horas. 161	
Figura 7.5. Láminas medias precipitadas entre torres..	162
Figura 7.6. Retícula de puntos para ubicación de los pluviómetros, para la prueba de aspersión.	166
Figura 7.7. Láminas precipitadas por hora con espaciamientos de 9 m por 12m.	168
Figura 7.8. Láminas precipitadas con traslape 9 m, por 9 m. 176 169	
Figura 7.9. Volúmenes captados en los aforos de todos los aspersores de las dos tuberías.	170
Figura 7.10. Sistema de aspersión portátil	174
manual evaluado.	170

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 1

Cuadro 1.1. Valores de la ED para varios CU y porcentajes de área adecuadamente regada (Keller y Bliesner (1990).	26
--	----

CAPÍTULO 2

Cuadro 2.1. Almacenamiento de agua aprovechable en suelos.	43
---	----

CAPÍTULO 3

Cuadro 3.1. Datos de pluviometría de un aspersor, con efecto ligero del viento.	56
Cuadro 3.2. Frecuencias de precipitaciones obtenidas de la lluvia de un aspersor.	57
Cuadro 3.3. Gastos de una tubería de riego por aspersión a nivel, calculada con datos de un aspersor y diámetro de tubería regante.	57
Cuadro 3.4. Frecuencias de gastos en una tubería de riego por aspersión.	58
Cuadro 3.5. Volúmenes (cm ³) captados en la prueba de un aspersor individual en cuadrícula, con espaciamientos de 2 m entre pluviómetros.	59
Cuadro 3.6. Parámetros estadísticos correspondientes a los cinco casos de traslapes simulados con la información de un aspersor.	61
Cuadro 3.7. Volúmenes captados durante el riego en la posición central.	62
Cuadro 3.8. Parámetros estadísticos de la evaluación de riego por aspersión de una tubería regante considerando cuatro casos de análisis.	64

CAPÍTULO 4

Cuadro 4.1. Características de medidores de flujo.	77
--	----

CAPÍTULO 5

No cuenta con cuadros

CAPÍTULO 6

Cuadro 6.1. Pérdidas por arrastre y evaporación en sistemas de riego por aspersión.	100
Cuadro 6.2. Relación entre gastos y presiones de emisores, con la eficiencia de distribución hidráulica que generan, en una tubería operando a nivel.	105
Cuadro 6.3. Gastos de los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante.	107
Cuadro 6.4. Gastos, volúmenes y láminas de los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante y eficiencias hidráulicas de distribución.	108
Cuadro 6.5. Tamaño de la muestra de aspersores.	117
Cuadro 6.6. Láminas medidas en una prueba de evaluación de una tubería regante.	124
Cuadro 6.7. Parámetros estadísticos obtenidos del área regada con la tubería regante y caracterizada con diferentes condiciones de traslape.	124
Cuadro 6.8. Resultados del cálculo de la descarga de los aspersores.	128
Cuadro 6.9. Procedimiento de cálculo del ejemplo en resumen.	130
Cuadro 6.10. Periodos estimados para depreciación de los componentes de un sistema de riego por aspersión.	131
Cuadro 6.11. Mano de obra estimada por hectárea de riego.	133
Cuadro 6.12. Costos fijos.	133
Cuadro 6.13. Costo por mano de obra.	134
Cuadro 6.14. Costos de energía.	134
Cuadro 6.15. Costos totales.	134

Cuadro 6.16. Costo por actividad.	134
Cuadro 6.17. Valor de la cosecha, costo de producción, utilidad, relación beneficio-coste e indicadores.	135
Cuadro 6.18. Cuadro de indicadores de desempeño y recomendaciones para mejoramiento.	144

CAPÍTULO 7

Cuadro 7.1. Parámetros meteorológicos necesarios para calcular la evapotranspiración de referencia.. . . .	149
Cuadro 7.2. Precipitación pluvial mensual y la lluvia efectiva o aprovechable.	150
Cuadro 7.3. Reducción de la producción del cultivo de caña, en relación al aumento de la salinidad en la solución del suelo (extracto a saturación del suelo)..	151
Cuadro 7.4. Aportaciones del manto freático a la zona de las raíces.. . . .	152
Cuadro 7.5. Datos del predio, del usuario, del tipo de tenencia, superficie y localidad.. . . .	155
Cuadro 7.6. Datos de la fuente de abastecimiento.	155
Cuadro 7.7. Datos del cultivo, de la pendiente del terreno y del suelo.. . . .	155
Cuadro 7.8. Datos del sistema de riego por aspersión.. . . .	156
Cuadro 7.9. Tramo definido por número de torre y la cantidad de pluviómetros entre torres.. . . .	157
Cuadro 7.10. Datos de tiempos de la prueba.	158
Cuadro 7.11. Volúmenes de agua captados en la prueba de aspersión.. . . .	168
Cuadro 7. 12. Parámetros estadísticos de la prueba de la lluvia.	161
Cuadro 7.13. Láminas medias aritméticas captadas entre los tramos de las torres, diferencia con la media y condición de riego.. . . .	161
Cuadro 7.14. Parámetros estadísticos de la prueba de lluvia del pivote.	162
Cuadro 7.15. Datos generales del predio, propietario y evaluador.. . . .	164
Cuadro 7.16. Datos de la fuente de abastecimiento.	164
Cuadro 7.17. Datos del cultivo, de la pendiente del terreno y del suelo.	164
Cuadro 7.18. Datos del sistema de riego por aspersión.	164
Cuadro 7.19. Tiempos de la prueba.	167
Cuadro 7.20. Volúmenes de agua captados en dos horas de pruebas de aspersión.	167
Cuadro 7.21. Datos de la precipitación captada transformados a mm/h.	167
Cuadro 7.22. Parámetros estadísticos de la prueba de la lluvia.	167
Cuadro 7.23. Láminas captadas simulando el traslape, cerrando las tuberías a 9 m. de espaciamiento.. . . .	168
Cuadro 7.24. Parámetros estadísticos de la prueba de lluvia considerando traslape de 9 m. por 9 m.	169

Cuadro 7.25. Volúmenes captados en la descarga de los aspersores (1) en 36 segundos de flujo.	170
Cuadro 7.26. Volúmenes captados en la descarga de los aspersores (2) en 36 segundos de flujo.	170
Cuadro 7.27. Volúmenes captados ordenados de mayor a menor.	171
Cuadro 7.28. Parámetros de la prueba de uniformidad de distribución hidráulica.	171
Cuadro 7.29. Datos para el cálculo del cuarto bajo.	172
Cuadro 7.30. Cuadro resumen de datos calculados en la evaluación del sistema de riego por aspersión.	172
Cuadro 7.31. Cuadro resumen de cálculos realizados en la evaluación del sistema de riego con simulación de mejor traslape de lluvia..	174
Cuadro 7.32. Pérdidas de agua expresadas en lámina y con las condiciones actual y mejorado el sistema de riego.	175
Cuadro 7.33. Aplicación de resultados de una evaluación para proyectar un riego eficiente con un sistema de riego por aspersión.	177



Para conocer el grado de desempeño del funcionamiento de un sistema de riego, se usa el concepto de eficiencia de riego.

1.1 Antecedentes

A continuación se presentan antecedentes sobre eficiencia global y parcial de riego, eficiencia en riego por aspersión y uniformidad de distribución en riego por aspersión.

1.1.1. Eficiencia global y parcial de riego

Desde la década de 1940 a 1950, se han publicado trabajos que incluyen o tratan el desempeño de los sistemas de riego y de la eficiencia del uso del agua en la agricultura.

En el libro *Irrigation of Agricultural Lands* se incluyó un capítulo de mejoramiento del riego, en el que se usó el término de eficiencia de riego para expresar el desempeño de un sistema de riego completo o de los componentes del sistema, de acuerdo con las necesidades de la evaluación.

Tomando los conceptos básicos de ese trabajo, se presenta un análisis de los términos siguientes:

Eficiencia global de riego (E_g). Es el producto de las eficiencias de los componentes individuales de un sistema de riego expresados como cocientes.

En este punto, aclaran que *los términos que definen la uniformidad y la aceptación de un riego no deberían ser etiquetados como términos de eficiencia, si el producto de todos los considerados no da la eficiencia global*. Propusieron que la eficiencia global (E_g) debería ser el producto de las eficiencias de almacenamiento (E_{alm}), de conducción (E_c) y aplicación (E_a).

Eficiencia de almacenamiento del embalse o reservorio (E_{alm}). Es el cociente de dividir el volumen de agua (V_{ext}), extraído para riego del embalse, entre el volumen para riego (V_{cap}) que fue captado o introducido al embalse, ya sea superficial o subterráneo.

Eficiencia de conducción (E_c). Es el cociente de dividir el volumen de agua entregado por un sistema de conducción abierto o cerrado a la zona de riego (V_{ent}), entre el volumen de agua entregado al sistema de conducción o volumen extraído (V_{ext}).

Eficiencia de aplicación (E_a). Es el cociente de dividir el volumen de agua de riego usado en evapotranspiración en un área específica de riego, más el volumen necesario para mantener un contenido favorable de sales en la solución del suelo, menos el volumen de la lluvia aprovechable en esa área de riego, entre el volumen de agua suministrado o entregado a esa área (V_{ent}). Para simplificar, al numerador se le llama volumen de requerimiento de riego (V_{rr}).

Lo anterior se puede expresar de la manera siguiente:

$$E_g = E_{alm} \times E_c \times E_a = \frac{V_{ext}}{V_{cap}} \times \frac{V_{ent}}{V_{ext}} \times \frac{V_{rr}}{V_{ent}} = \frac{V_{rr}}{V_{cap}}$$

Para medir la **eficiencia global de riego (E_g)**, propusieron la fórmula siguiente:

$$E_g = \frac{(V_t + V_l - V_e) * 100}{V_{cap}}$$

E_g – Eficiencia de riego (%).

V_t – Volumen estimado de evapotranspiración (cm).

V_l – Volumen de agua requerida para lavado de sales (cm).

V_e – Volumen de agua de lluvia aprovechada o efectiva (cm).

V_{cap} – Volumen que fue captado o introducido al embalse (cm).

1.1.2. Eficiencia en riego por aspersión

El Dr. Jesús Montero, en su tesis titulada *Análisis de la distribución del agua en sistemas de riego por aspersión estacionario*, con subtítulo *Desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión (SIRIAS)*, realizó una revisión de trabajos especializados relativos a eficiencias y uniformidades de aplicación del agua en riego por aspersión y, en este trabajo, se incluyen aspectos sobresalientes.

En relación con la distribución del agua en los sistemas de riego por aspersión, indica que:

La terminología utilizada para describir el comportamiento del riego a nivel de parcela incluye normalmente los términos de eficiencia y uniformidad. Y que *“lamentablemente no existe ningún parámetro que por sí solo, sea suficiente para describir el comportamiento del riego, por lo que siempre se valoran varios parámetros a la vez”*.

Explica que la uniformidad del riego indica el grado de igualdad de dosis recibida por los diferentes puntos de la parcela, y que la eficiencia de riego se suele entender como el porcentaje de agua bruta aplicada que es aprovechada para satisfacer las necesidades del cultivo y las de lavado.

Sobre la uniformidad de distribución del agua (UD), indica que: se define como la relación entre alguna medida de mínima altura interceptada y la altura media interceptada (cabe aclarar que El Dr. Montero considera altura interceptada como el agua infiltrada y el agua utilizada por la cubierta vegetal). Además, aclara que sólo debe cuantificarse el área con plantas y evitar las zonas secas entre plantas.

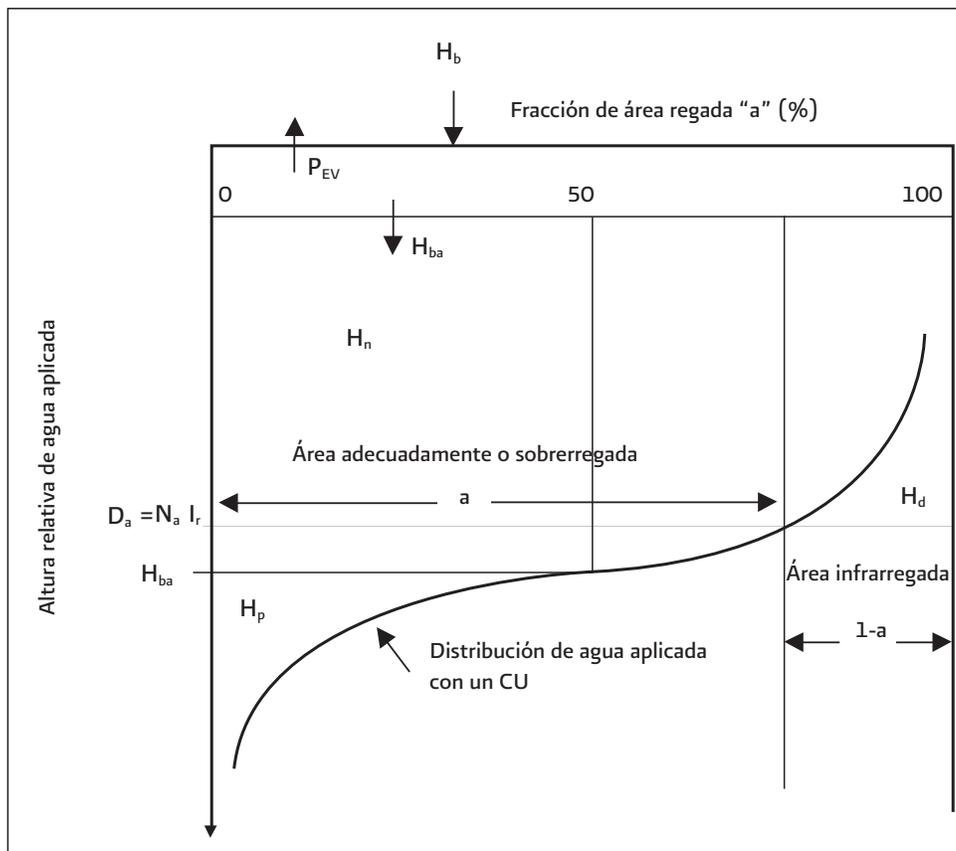


Figura 1.1. Diagrama de distribución del agua en riego por aspersión presentado por Tarjuelo, 1995.

Presenta un diagrama típico de la distribución del agua en un riego por aspersión citando a Tarjuelo, 1995, que se presenta en la figura 1.1.

En la figura 1.1 se considera que:

H_b – Es la lámina bruta aplicada.

P_{ev} – Son las pérdidas evitables (fugas en las conducciones, lavado de filtros y tuberías, escurrimientos, etcétera) e inevitables como la evaporación.

H_{ba} – Lámina media infiltrada ($H_{ba} = H_b - P_{ev}$).

a – Proporción de área que recibe al menos el agua que se quería aplicar. Y $1-a$ es el resto del área que queda con déficit.

D_n – Lámina neta requerida o programada.

H_n – Lámina media de agua almacenada en la zona de las raíces.

H_p – Lámina media percolada.

H_d – Lámina media de déficit.

Bajo estas condiciones, la **calidad del riego del área bien regada o sobrerregada** puede definirse basándose en los parámetros siguientes:

Nótese que no toma en cuenta el área mal regada o con déficit.

Eficiencia de aplicación:

$$R_a = \frac{H_n}{H_{ba}}$$

R_a - Eficiencia de aplicación en la zona bien regada (decimal).

H_n - Lámina media de agua almacenada en la zona de las raíces (cm).

H_{ba} - Lámina media infiltrada (cm).

Nótese que no toma en cuenta las pérdidas por evaporación y arrastre.

Eficiencia de distribución:

$$ED_a = \frac{D_n}{H_{ba}}$$

ED_a - Eficiencia de distribución para la zona bien regada (decimal).

D_n - Lámina neta requerida o programada (cm).

H_{ba} - Lámina media infiltrada (cm).

Coefficiente de déficit:

$$C_d = \frac{H_d}{D_n}$$

C_d - Coeficiente de déficit (decimal).

H_d - Lámina media de déficit (cm).

D_n - Lámina neta requerida o programada (cm).

Factor de disponibilidad:

$$F_a = \frac{H_n}{D_n}$$

F_a – Factor de disponibilidad (decimal).

H_n – Lámina media de agua almacenada en la zona de las raíces (cm).

D_n – Lámina neta requerida o programada (cm).

Porcentaje de percolación:

$$C_p = \frac{H_p}{H_b}$$

C_p – Porcentaje de percolación (decimal).

H_p – Lámina media percolada (cm).

H_b – Es la lámina bruta aplicada (cm).

El Dr. Montero plantea el término “Eficiencia general de aplicación en riego por aspersión” (E_r), indicando que se suele entender como el porcentaje de agua bruta aplicada que es aprovechada para satisfacer las necesidades del cultivo y las de lavado.

$$E_r = \frac{H_n}{H_b}$$

E_r – Eficiencia general de aplicación en riego por aspersión (decimal).

H_n – Lámina media de agua almacenada en la zona de las raíces (cm).

H_b – Es la lámina bruta aplicada (cm).

“Para calcular la relación entre dosis neta (D_n) y dosis bruta (D_b) en riego por aspersión, la eficiencia de aplicación (E_a) debe incluir los efectos de las pérdidas debidas a: falta de uniformidad en la aplicación, la percolación profunda, la evaporación, el arrastre por el viento y las fugas en las tuberías” (Keller y Bliesner, 1990), resultando:

$$D_b = \frac{D_n}{E_a}$$

D_b – Dosis bruta (cm).

D_n – Dosis neta (cm).

E_a – Eficiencia de aplicación (decimal).

Esta fórmula aplica cuando la fracción de lavado es menor a 0.1, y cuando es mayor a 0.1, aplica la fórmula siguiente.

$$D_b = \frac{0.9 * D_n}{E_a * (1 - FL)}$$

FL – Fracción de lavado.

El coeficiente 0.9 se incluye para tener en cuenta las pérdidas inevitables por percolación al considerarse que satisfacen el 10% de las necesidades de lavado.

La fracción de lavado se puede definir como:

$$FL = \frac{R}{D_n + R}$$

R – Lámina de lavado.

Para el diseño de un sistema de aspersión, la E_a para un determinado porcentaje “a” de área adecuadamente regada puede calcularse como (Keller y Bliesner, 1990):

P_e – Proporción efectiva de agua que llega al suelo (decimal).

P_f – Proporción de pérdidas de agua por fugas en las conducciones (decimal).

Proporción efectiva de agua que llega al suelo (P_e). El agua que se asperja puede evaporarse, ser arrastrada por el viento y precipitarse en la zona de riego.

CU (%)	% de área adecuadamente regada (a)									
	95	90	85	80	75	70	65	60	50	
	ED _a (%)									
94	88	88	92	94	95	96	97	98	100	
92	83	87	90	92	93	95	96	97	100	
90	79	84	87	89	92	93	95	97	100	
88	75	81	84	87	90	92	94	96	100	
86	71	77	82	85	88	91	93	96	100	
84	67	74	79	83	86	89	92	95	100	
82	63	71	77	81	85	88	91	94	100	
80	59	68	74	79	83	87	90	94	100	
78	55	65	71	77	81	86	89	93	100	
76	50	61	69	75	80	84	88	92	100	
74	46	58	66	73	78	83	87	92	100	
72	42	55	64	70	76	82	86	91	100	
70	38	52	61	68	75	80	85	90	100	
68	34	49	58	66	73	79	85	90	100	
66	30	45	56	64	71	78	84	89	100	

Cuadro 1.1. Valores de la ED para varios CU y porcentajes de área adecuadamente regada (Keller y Bliesner (1990)).

Pérdidas por fugas en las conducciones (P_f). En sistemas con adecuado mantenimiento, estas pérdidas pueden ser menores del 1% del caudal transportado; en sistemas con mantenimiento deficiente las pérdidas pueden superar el 10%. (Tarjuelo, 1995).

Para tener en cuenta la falta de uniformidad y las pérdidas por percolación profunda, se define eficiencia de distribución de agua (ED_a) para un cierto porcentaje de área "a" adecuadamente regada como:

$$ED_a = \frac{\text{altura neta mínima recibida por la fracción "a" del área regada}}{\text{Altura media recibida por el área regada}} * 100$$

Admitiendo que los datos para obtener el CU siguen una función de distribución normal, se presenta en el cuadro 1 (Keller y Bliesner, 1990) la relación entre los tres parámetros siguientes: uniformidad de aplicación (CU), área adecuadamente regada (a) y eficiencia de distribución del agua (E_{da}).

La eficiencia de distribución de agua en función de "a", puede calcularse con la ecuación (Allen, 1987):

$$ED_a = 100 + (606 - 24.9a + 0.349a^2 - 0.00186a^3)\left(1 - \frac{CU}{100}\right)$$

1.1.3. Uniformidad de distribución en riego por aspersión

Clemmens y Solomon presentan en el artículo "Estimación de la uniformidad de distribución del riego global", los aspectos siguientes sobre la uniformidad de distribución global de riego.

Para la mayoría de los sistemas de riego, el método más práctico para determinar la uniformidad de distribución global es medir la uniformidad resultante de varias componentes y combinarlas estadísticamente.

Uniformidad de distribución del cuarto bajo. Para propósitos agrícolas se presentó la fórmula siguiente:

$$DU_{1q} = \frac{\text{promedio del 25\% de las láminas de agua acumuladas con los valores más bajos}}{\text{lámina de agua acumulada promedio}}$$

Donde el promedio del cuarto bajo es la lámina promedio en un cuarto del área de elementos con las láminas más pequeñas. Esta definición da una ponderación si los elementos de área son de tamaños diferentes.

También anotaron que para riego por aspersión se ha usado el coeficiente de uniformidad de Christiansen, el cual representa la mitad de los valores menores, si la distribución es simétrica.

$$DU_{1q} = \frac{\text{promedio del 50 \% de las láminas de agua acumuladas con los valores más bajos}}{\text{lámina de agua acumulada promedio}}$$

Las uniformidades de distribución han sido tradicionalmente combinadas multiplicando las uniformidades de distribución de los componentes individuales (Burt et ál.1992).

$$DU_{a0} = DU_{a1} * DU_{a2}$$

Donde DU_{a0} es la uniformidad de distribución global y las otras DU_{a1} y DU_{a2} son las componentes 1 y 2.

Por otra parte, presentaron la uniformidad de distribución estadística (SDU) de la siguiente manera:

$$SDU_a = 1 - K_a * CV$$

Donde el subíndice (a) es la fracción de la población de elementos (o la fracción de las áreas elementales) considerados (por ejemplo el cuarto bajo); K_a es un coeficiente que depende de la distribución estadística y de la fracción de área y CV es el coeficiente de variación (desviación estándar entre la media). Para una distribución normal $K_{lq} = 1.27$, para distribución uniforme $K_{lq} = 1.30$, para distribución parabólica $K_{lq} = 1.68$ (Solomon, 1983).

Indicaron que en sistemas de riego portátiles manuales, semifijos y fijos, un problema común en la evaluación es que existe una componente de la uniformidad que depende del gasto de los aspersores, basado en medidas (o en modelos) de presiones o gastos de los aspersores a lo largo del campo, y otra componente de la uniformidad es el del patrón de lluvia en la aspersión. También explican que esas componentes pueden ser no independientes, porque al cambiar la descarga de un aspersor hay cambios en la lluvia captada en los recipientes y cambia la uniformidad de la lluvia captada.

Una recomendación para evaluar riego por aspersión de los tipos antes anotados, donde las diferencias de presiones entre secciones no sean grandes, es usar la ecuación siguiente:

$$SDU_{a0} = 1 - \sqrt{\left[\left(\frac{K_{a0} * m_1 * m_2}{K_{a1} * m_0} \right)^2 (1 - DU_{a1})^2 + \left(\frac{K_{a0} * m_1 * m_2}{K_{a2} * m_0} \right)^2 (1 - DU_{a2})^2 + \left(\frac{K_{a0} * m_1 * m_2}{K_{a1} * K_{a2} * m_0} \right)^2 (1 - DU_{a1})^2 * (1 - DU_{a2})^2 \right]}$$

SDU - Uniformidad de distribución estadística del sistema (con dos secciones evaluadas).

K_{a0}, K_{a1}, K_{a2} - Coeficiente que depende de la distribución de la población y de la fracción del área de la media baja, para la población y para las dos secciones de riego.

m_0, m_1, m_2 - medias de los datos de lluvia de la población y de las dos secciones.

DU_{a1}, DU_{a2} - Uniformidad de la lluvia en cada sección.

Mario Montiel (2010) redactó sobre la uniformidad de distribución, que se obtiene a partir de los datos de campo resultantes de la evaluación y que es un indicador de la distribución de la lámina infiltrada. Se expresa en % y se refiere a la uniformidad basada en el cuarto bajo.

Uniformidad de distribución del cuarto bajo.

$$DU_{iq} = \frac{\text{promedio del 25\% de las láminas de agua acumuladas con los valores más bajos} * 100}{\text{lámina de agua acumulada promedio}}$$

Indica que Keller (1990), citado por Tarjuelo (1999), define la uniformidad de distribución de una sección de la siguiente manera:

$$UD_s = UD * \frac{1}{4} * [1 + 3 \left(\frac{P_n}{P_a} \right)^{0.5}]$$

UD_s – Uniformidad de distribución de la sección.

UD – Uniformidad de distribución de la lluvia con el cuarto bajo.

P_n – Presión mínima de un aspersor de la sección.

P_a – Presión media de los aspersores en la sección de riego.

En esta fórmula se integran los dos componentes que influyen en la uniformidad del riego; sin embargo, no se indica nada sobre límites para calificación ni para la mejora de los sistemas de riego. La ventaja de esta fórmula, es que en lugar de diferencias de descargas de los emisores, propone usar diferencias de presiones, que se pueden obtener con manómetros con tubos de Pitot, de manera muy práctica.

1.2 Método propuesto para calcular la eficiencia global de sistemas de riego por aspersión

1.2.1. Eficiencia, uniformidad y pérdidas de agua en el sistema de riego

En los antecedentes, se observa que los procedimientos y parámetros que se desarrollaron con el objetivo de aplicar las herramientas estadísticas para evaluar el desempeño de los sistemas de riego por aspersión, se enfocaron a dar resultados numéricos tendientes a representar globalmente la uniformidad de distribución de las láminas aplicadas en el sistema de riego y no a indicadores que permitan dar recomendaciones directas para mejorar la operación o el sistema de riego.

Esto parece indicar que los procedimientos y parámetros de los investigadores se fueron alejando de los objetivos de los agricultores y de sus indicadores, para mejorar el uso del agua de riego e incrementar la productividad de los cultivos.

Tomando en cuenta los antecedentes, se desarrolló un método que integró los parámetros indicadores del buen funcionamiento de los sistemas de riego por aspersión, incluyendo el uso y manejo del agua desde la fuente de abastecimiento hasta las plantas de la zona de cultivo.

Esto se logró incluyendo las eficiencias de almacenamiento, conducción y aplicación del agua en los sistemas de riego por aspersión y se resalta que se incluyó un análisis de las pérdidas de agua durante el proceso de almacenamiento, conducción y aplicación del agua, que permitió enfocar de manera diferente los conceptos de uniformidad de lluvia de los aspersores y la uniformidad de distribución hidráulica para incluirlos como pérdidas de agua debidas a la falta de uniformidad de riego.

1.2.2. Evaluaciones agronómica e hidráulica

Los sistemas de riego deberían evaluarse desde el punto de vista de agricultura sustentable, del funcionamiento hidráulico y desde el enfoque económico.

La evaluación del sistema de riego por aspersión (agronómica e hidráulica) incluye aspectos sobre el desempeño del sistema de riego, la productividad del agua y la eficiencia global del sistema, sus eficiencias parciales y las pérdidas de agua en las diferentes fases del proceso de riego.

El estudio del desempeño de los sistemas de riego incluye los temas de: evaluación con presiones y gastos del sistema de riego, evaluación de la uniformidad hidráulica del sistema y evaluación de la uniformidad de la lluvia generada por los aspersores.

Los indicadores de desempeño deben señalar las acciones que deben desarrollarse para mejorar el sistema de riego o su operación, para sostener o incrementar la producción de los cultivos.

1.2.3. Evaluación económica

La evaluación económica del sistema de riego incluye los aspectos de los costos del sistema de riego y su vida útil, los aspectos de costos de los cultivos y de su productividad, para llegar a la relación beneficio-costos del sistema de riego.

1.2.4. Conocimientos necesarios para la evaluación de los sistemas de riego por aspersión

Con el objetivo de evaluar el desempeño de los sistemas de riego por aspersión, se requiere conocer las partes fundamentales que los integran y los tipos de sistemas que se utilizan en la agricultura.

Por otra parte, con la finalidad de evaluar agronómicamente los sistemas de riego por aspersión es necesario conocer conceptos sobre: las relaciones entre agua, suelo, planta y el riego por aspersión; láminas de riego; aspectos de salinidad relacionados con el riego por aspersión y requerimientos de riego de los cultivos.

Para evaluar hidráulicamente sistemas de riego por aspersión es necesario conocer conceptos básicos de estadística y los parámetros básicos para caracterizar muestras o poblaciones, como medidas de tendencia central y dispersión y distribuciones de frecuencias, así como los aspectos fundamentales del funcionamiento de los aspersores y de las tuberías regantes.

Por último, para la evaluación económica se requiere conocer el inventario de un sistema de riego y la vida útil de los componentes, el costo por partes y global, los costos de operación, los costos de cultivo, la producción y el precio de venta del producto.

Los aspectos señalados en los párrafos anteriores se tratan en los capítulos 2, 3, 4 y 5, y el procedimiento propuesto de evaluación del desempeño de los sistemas de riego por aspersión se trata detalladamente en el capítulo 6.



El éxito del riego por aspersión depende de que la velocidad de infiltración del agua en el suelo sea mayor que la intensidad de precipitación, para que no ocurran encharcamientos, ni suelo saturado y de que se apliquen las láminas de riego requeridas por el cultivo.

En este capítulo se presentan conceptos sobre: relaciones agua-suelo-riego por aspersión, como son: almacenamiento del agua en el suelo, disponibilidad del agua para las plantas, movimiento del agua en el suelo, láminas de riego, salinidad en riego por aspersión y requerimiento de riego.

2.1 Relaciones agua-suelo-riego por aspersión

2.1.1. Almacenamiento de agua en el suelo

Para obtener buenas cosechas con riego por aspersión, se necesita saber cuánta agua debe suministrarse al cultivo.

Para conocer cuánta agua se requiere aplicar en un riego por aspersión, es necesario conocer la cantidad de agua que pueden almacenar los suelos y la humedad que contienen antes del riego, para aplicar la faltante para llenar el almacén considerado. También, indirectamente, se puede conocer la cantidad de agua que consumió el cultivo en el periodo de tiempo transcurrido desde el riego anterior y, además en los dos casos, la cantidad de agua que se pierde por evaporación y arrastre durante la aspersión del agua de riego.

Los suelos contienen partículas sólidas y poros. Los sólidos son minerales y materia orgánica y los poros pueden estar ocupados por agua, aire o una combinación de agua y aire.

Los parámetros de contenidos de humedad del suelo relacionados con riego son: suelo saturado, suelo a capacidad de campo, suelo a porcentaje de marchitamiento permanente y seco.

2.1.1.1. SUELO SATURADO

Un suelo agrícola que tiene todos los poros llenos de agua está saturado (SS). En la práctica se dice que los suelos en campo no llegan a saturarse completamente porque queda aire atrapado en poros muy pequeños, entonces quedan casi saturados, pero aun así se les llamará "saturados". La capa superficial de los suelos se puede saturar después de una lluvia fuerte que produzca encharcamientos o inmediatamente después del riego en surcos y melgas,

donde se presente inundación parcial o total. En estas condiciones se genera una saturación temporal del suelo en la superficie encharcada. También en las zonas que tienen mantos freáticos, por debajo del nivel libre del agua o nivel estático, se dice que se encuentra saturado el suelo.

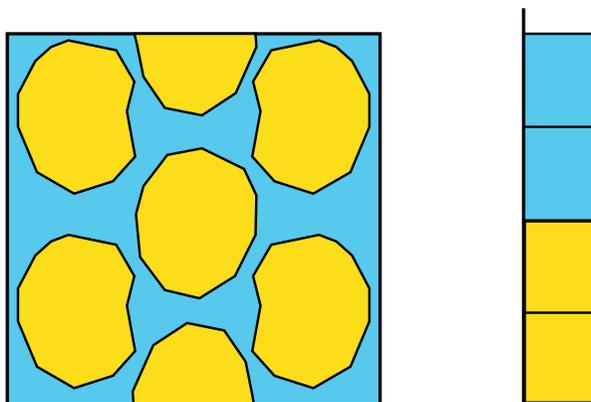


Figura 2.1. Suelo saturado.

Los cultivos pueden afectarse severamente si se presentan condiciones de saturación en el suelo por periodos de tiempo grandes, y pueden reducir su producción si los periodos de saturación son menores; esto, dependiendo de su resistencia a la inundación.

Debido a que en riego por aspersión se produce artificialmente la lluvia, es fundamental que la intensidad de la lluvia generada sea menor que la capacidad de absorción del agua o que la velocidad de infiltración del agua en el suelo, con la finalidad de evitar la saturación de la capa superficial y aprovechar al máximo el potencial de crecimiento y de producción del cultivo.

Por ejemplo, si un cultivo de alfalfa cultivado en melgas es regado por inundación después del corte, la inundación temporal y su efecto de saturación retrasan su crecimiento en comparación con el mismo cultivo regado por aspersión, sin saturación del suelo.

2.1.1.2. SUELO A CAPACIDAD DE CAMPO

Un suelo con buen drenaje interno, después de un riego pesado o de una lluvia intensa y de gran magnitud, se satura temporalmente en su capa superficial y al pasar el tiempo (cuatro horas en arenas y hasta más de 72 horas en suelos arcillosos), se drena por acción de la gravedad. Cuando deja de drenar, queda con un contenido de humedad en los poros capilares retenido contra la acción de la gravedad. A este contenido de humedad en el suelo se le llama capacidad de campo (CC). Para fines de estandarización, se ha considerado que la fuerza de retención del agua a capacidad de campo corresponde a 0.3 atmósferas de tensión.

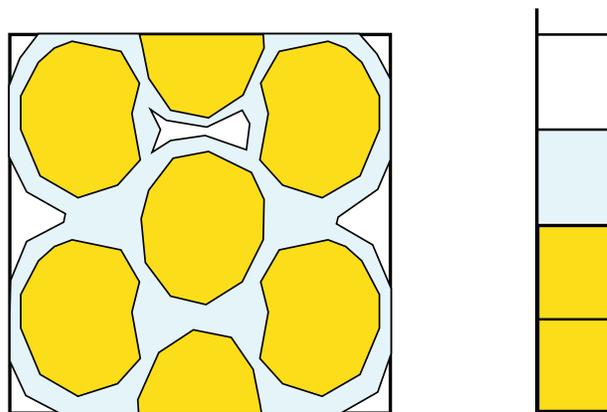


Figura 2.2. Suelo con contenido de humedad a capacidad de campo.

Cuando se riega un cultivo por aspersión, un objetivo es que se aplique la cantidad de agua necesaria para que el suelo quede a capacidad de campo en el espesor de la mayor actividad de las raíces; sin embargo, para lograr esto, generalmente es necesario aplicar un volumen excedente de agua para compensar las pérdidas que se presentan por la evaporación y arrastre del agua en la trayectoria que sigue desde el aspersor hasta el suelo, por la falta de uniformidad en el riego, y también cuando hay necesidad de aplicar agua en exceso para controlar las sales solubles del suelo.

2.1.1.3. SUELO A MARCHITAMIENTO PERMANENTE

Los cultivos consumen agua del suelo. Una parte se evapora de la superficie y otra es extraída del suelo por las raíces de las plantas; conforme la consumen, disminuyen el contenido de humedad del suelo en la zona de las raíces y también se concentra la solución del suelo. Al reducirse el contenido de humedad y concentrarse la solución del suelo, el agua es retenida con mayor fuerza por la acción de fuerzas capilares que actúan en los poros que forman las partículas del suelo y también actúa mayor presión osmótica. El proceso sigue hasta un nivel en el que las plantas no pueden absorber fácilmente. En estas condiciones, las plantas empiezan a realizar un esfuerzo grande para extraer el agua, hasta que absorben menos que la transpirada y sus células empiezan a perder turgencia o, en términos prácticos, a secarse.

Cuando la planta presenta marchitez, si se le agrega agua y se recupera, la marchitez fue temporal; si no se recupera, la marchitez es permanente. En estas condiciones, en el suelo aún queda agua retenida con gran fuerza (15 atmósferas). A ese contenido de agua del suelo se le llama "contenido de humedad a marchitamiento permanente"; también se le denomina "porcentaje de humedad a marchitamiento permanente" o, para simplificar, se le llama "punto de marchitamiento permanente" (PMP).

En condiciones generales, conforme las plantas realicen mayor esfuerzo para obtener el agua y los nutrimentos, menor será su productividad, porque de la energía que recibe una parte es la que utiliza para la absorción de agua, otra para las funciones siguientes: nutrición, desarrollo y fructificación; entre más energía use en la absorción menos usará en las otras funciones y tendrá menor rendimiento.

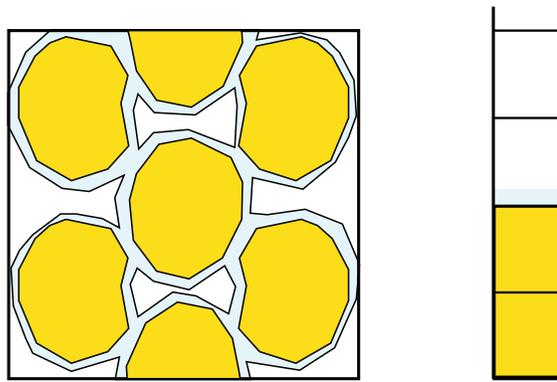


Figura 2.3. Suelo con porcentaje de humedad a marchitamiento permanente.

Por lo anterior, no debe dejarse consumir el agua del suelo hasta el PMP. Este debe usarse para el cálculo de la lámina del primer riego, para asegurar que el suelo se humedezca bien y que las semillas puedan germinar.

El suelo puede secarse más que el nivel de humedad a marchitamiento permanente, sobre todo en los primeros centímetros de la capa superficial, quedando la poca agua adherida a la superficie de las partículas de suelo; esta es la humedad higroscópica y no es aprovechable.

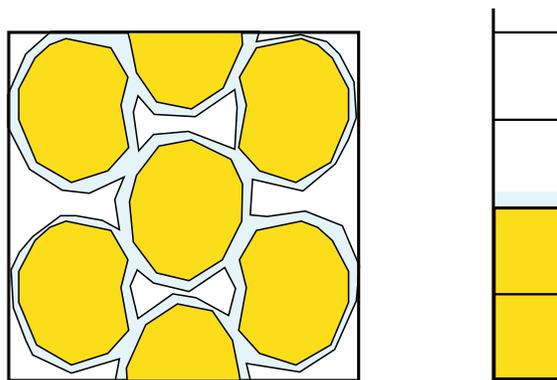


Figura 2.4. Suelo con humedad higroscópica.

2.1.1.4. AIREACIÓN DENTRO DEL SUELO

Como en el riego por aspersión no se presentan o no deben presentarse condiciones de suelo saturado, las condiciones de aireación para la mayoría de los cultivos son muy favorables.

El volumen de aire y agua en el suelo (volumen total de poros) y el volumen de sólidos, dependen de los tamaños de las partículas y su distribución en el suelo. Los suelos de mayor porosidad son los arcillosos y los de menor porosidad son los arenosos. Sin embargo, en los arcillosos son poros de tamaño pequeño que dificultan el movimiento del agua y del aire a través del suelo, esto genera poca aireación y baja conductividad hidráulica. Esto es desventaja para el riego por aspersión.

Los suelos arenosos tienen un volumen pequeño de poros; no obstante, son poros de tamaño grande que facilitan el movimiento del agua y del aire a través del suelo, esto genera buena aireación y alta conductividad hidráulica que favorecen al riego por aspersión.

El volumen de aire del suelo determina la posibilidad de suministrar oxígeno a las raíces y el intercambio gaseoso con el medio ambiente y, adicionalmente, al presentar condiciones favorables se garantiza la formación de un extenso sistema radical, asociado con la absorción de nutrientes y agua.

La aireación que se genera con riego por aspersión, favorece especialmente a cultivos como la alfalfa y la caña, que se cosechan cortando las plantas y deben brotar de nuevo, porque no inunda y no satura el suelo, de manera que los retoños brotan más pronto que en riego superficial.

2.1.2. Disponibilidad del agua

Para obtener buenas cosechas de los cultivos, se requiere que el agua y los nutrimentos del suelo estén en condiciones de ser fácilmente absorbidos por la raíz. De la energía total que puede aprovechar una planta, usa una parte para absorber el agua con los nutrimentos del suelo; y la restante la utilizan para desarrollar sus funciones fisiológicas, como crecer, formar sus tejidos y sus frutos.

Para que el agua sea fácilmente aprovechable en el suelo, es necesario que se reponga frecuentemente la cantidad de agua que consume el cultivo; esto genera que se apliquen riegos ligeros o de láminas pequeñas. Con el riego por aspersión esto puede realizarse con facilidad y buena eficiencia.

Con la finalidad de interpretar el grado de disponibilidad del agua en el suelo, se describen a continuación los conceptos siguientes: humedad aprovechable total y humedad fácilmente aprovechable.

2.1.2.1. *HUMEDAD APROVECHABLE TOTAL*

Se denomina humedad aprovechable total al contenido de humedad que teóricamente pueden utilizar los cultivos, y corresponde a la humedad que almacena un suelo entre capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente.

En la práctica, no se puede aprovechar totalmente el agua que se almacena entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente en un suelo, porque las plantas serían afectadas por un déficit de agua que les produciría la marchitez permanente. Por lo anterior, fue necesario definir un contenido de humedad en el rango aprovechable, fácilmente extraíble, para que las plantas no se estresaran tanto al absorber el agua del suelo.

2.1.2.2. HUMEDAD FÁCILMENTE APROVECHABLE

Al volumen de agua que las plantas extraen del suelo después de un riego, sin hacer un esfuerzo grande, se le llama “humedad fácilmente aprovechable”. En cultivos bajo riego, el volumen de agua o porcentaje de humedad aprovechable que se debe permitir extraer entre riegos, es la humedad fácilmente aprovechable. El porcentaje de humedad fácilmente aprovechable corresponde al factor de extracción o abatimiento del agua del suelo.

Es necesario dejar que se consuma la menor cantidad de humedad fácilmente aprovechable y reponerla al suelo para mantener los cultivos en las condiciones más favorables para su desarrollo o crecimiento; esto puede realizarse con los sistemas de riego por aspersión debido a que se pueden aplicar láminas de riego pequeñas en intervalos de tiempo cortos. Los pivotes, avances frontales y cañones son sistemas de riego que pueden aplicar láminas de riego pequeñas con intervalos cortos de tiempo.

A continuación, se presentan curvas de retención de humedad de suelos ligeros. En las ordenadas se consideró la tensión con que el suelo retiene la humedad, y en las abscisas el contenido de humedad en porcentaje de volumen de agua retenida en el suelo a la tensión correspondiente.

Si se considera que tres atmósferas es el límite máximo de tensión de la humedad en el suelo, hasta el cual las plantas extraen agua fácilmente aprovechable, se observa en la figura 2.5 que la mayor parte de la humedad aprovechable se encuentra fácilmente disponible en los suelos de texturas medias a arenosas.

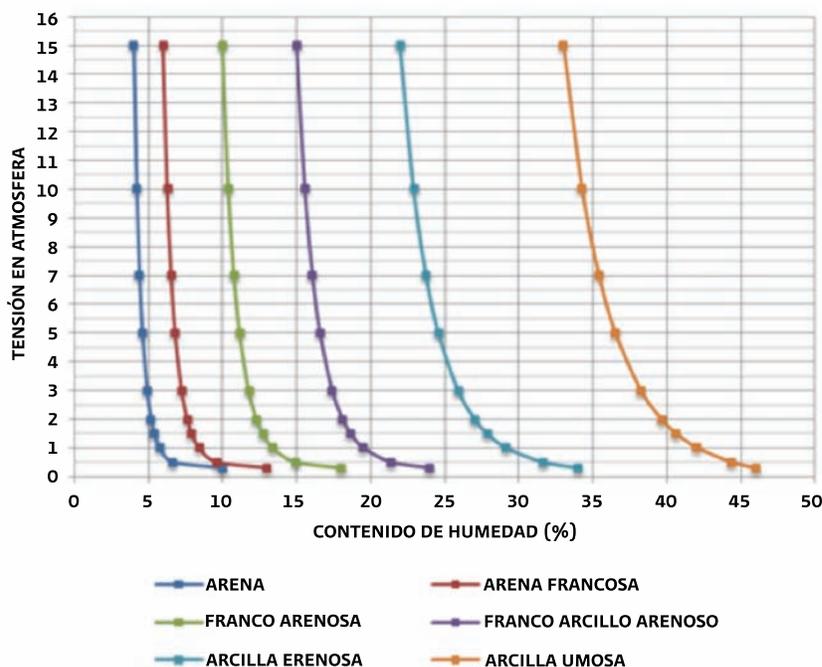


Figura 2.5. Curvas de retención de humedad de suelos.

2.1.3. Movimiento del agua en el suelo

En riego por aspersión es muy importante conocer cómo se mueve el agua en el suelo, desde su infiltración, su distribución en el momento del riego y su redistribución después del riego.

El suelo según su textura tiene propiedades relacionadas con la velocidad de infiltración del agua, con la capacidad de almacenamiento y con la aireación, por lo que la textura sirve como indicador para aceptar la adaptabilidad del riego por aspersión a los suelos.

El riego por aspersión tiene ventajas sobre otros métodos de riego en suelos con texturas desde francas hasta arenosas y en los cultivos de cobertura total.

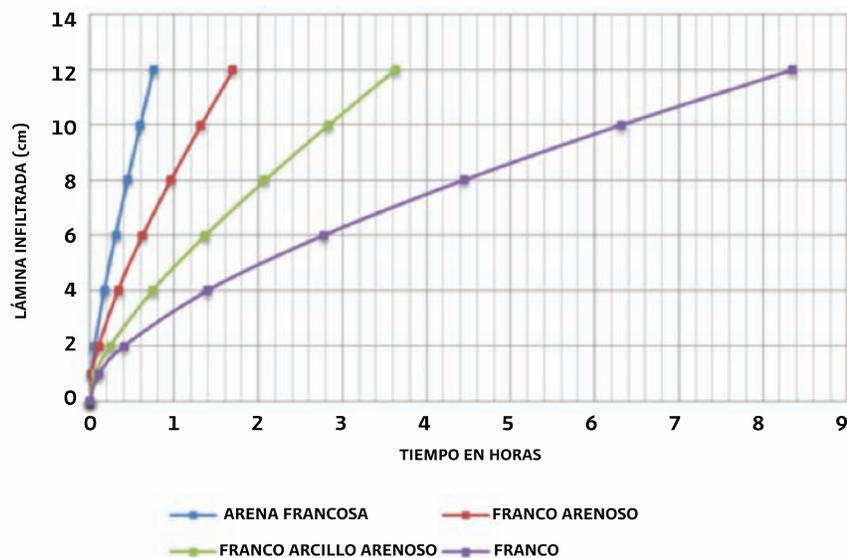


Figura 2.6. Curvas de infiltración acumulada del agua en suelos ligeros.

2.1.3.1. INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO EN RIEGO POR ASPERSIÓN

El agua debe penetrar en el suelo o ser absorbida por su medio poroso sin saturar su capa superficial, porque al saturarse puede escurrir hacia otro sitio no proyectado; o puede encharcar con posibilidad de perder agua por percolación. Saturar el suelo por tiempos mayores de tres días puede reducir la productividad del cultivo por falta de aireación.

Para caracterizar la infiltración del agua en el suelo se usan curvas de infiltración acumulada y de velocidad de infiltración instantánea, generadas de datos de campo.

2.1.3.2. INFILTRACIÓN ACUMULADA

A continuación, se presenta la figura 2.6 con cuatro curvas de infiltración acumulada para texturas de suelo ligeras o de tendencia arenosas. Se observa que en la textura arenosa se

pueden infiltrar 12 cm de lámina en 45 minutos, en la franco arenosa se infiltran en una hora y 44 minutos, en la franco arcillo arenosa se infiltran en un poco menos de cuatro horas y, por último, en el caso de suelo franco, deben emplearse un poco más de ocho horas para que se infiltren los 12 cm de lámina de riego.

Las curvas de láminas infiltradas acumuladas en el tiempo sirven para determinar gráficamente los tiempos de riego del sistema de aspersión para aplicar láminas de riego específicas. Debe tomarse en cuenta que la lluvia no debe generar escurrimiento del agua o encharcamiento.

2.1.3.3. VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

El éxito del riego por aspersión depende, en primer lugar, de que la velocidad potencial de infiltración del agua en el suelo sea mayor que la intensidad de precipitación para que no existan escurrimientos, encharcamientos, ni suelo saturado y, en segundo lugar, depende de que se apliquen las cantidades requeridas de agua. Generalmente, en riego por aspersión estándar el agua cae al suelo en forma de lluvia, de manera intermitente y varía la superficie mojada en cada movimiento del aspersor; sin embargo, en el suelo, mediante la capilaridad se distribuye la humedad en el área dominada por la lluvia del aspersor, mejorando la uniformidad de humedecimiento del suelo.

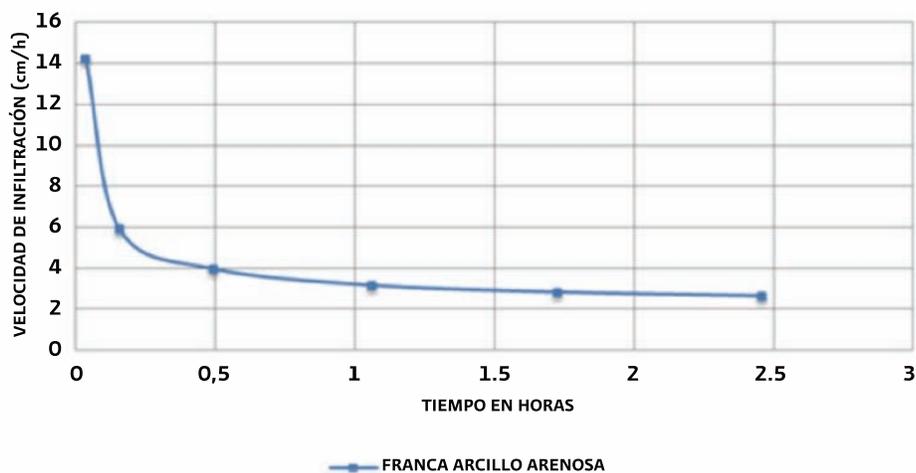


Figura 2.7. Curva de velocidad de infiltración del agua en suelo franco arcillo arenoso.

Si se aplica el riego por aspersión con precipitación promedio de 2 cm/h, en tres horas el sistema de riego aporta una lámina de 6 cm. En la figura 2.7 se observa que el área bajo la curva entre dos límites de tiempo es la lámina total que el suelo absorbe en el tiempo fijado por los límites. Si se aplicara una intensidad de precipitación de 4 cm/h, se observa en la gráfica que después de media hora el agua empezaría a escurrir o encharcar.

Los suelos limosos y francos, de textura media, tienen la mayor parte de las partículas de tamaño intermedio y son suelos fáciles de manejar; retienen suficiente agua y tienen velocidades de infiltración medias. Estos suelos, en general, se pueden regar muy bien con los sistemas de riego por aspersión, seleccionada correctamente la intensidad de lluvia necesaria.

Por último, los suelos arenosos contienen la mayor parte de sus partículas sólidas de tamaño grande, que retienen poca agua, por lo que requieren de riegos frecuentes; además tienen altas velocidades de infiltración del agua. Por estas características, son los suelos que presentan mayor ventaja para usar riego por aspersión, sobre todo en los cultivos de cobertura total. En estos suelos, la mayor parte del agua disponible es fácilmente aprovechada por los cultivos; sin embargo, si se deja bajar el contenido de humedad cerca del PMP, el cambio de esfuerzo que las plantas deben hacer para extraerla del suelo es muy grande y pueden tener marchitez temporal extrema.

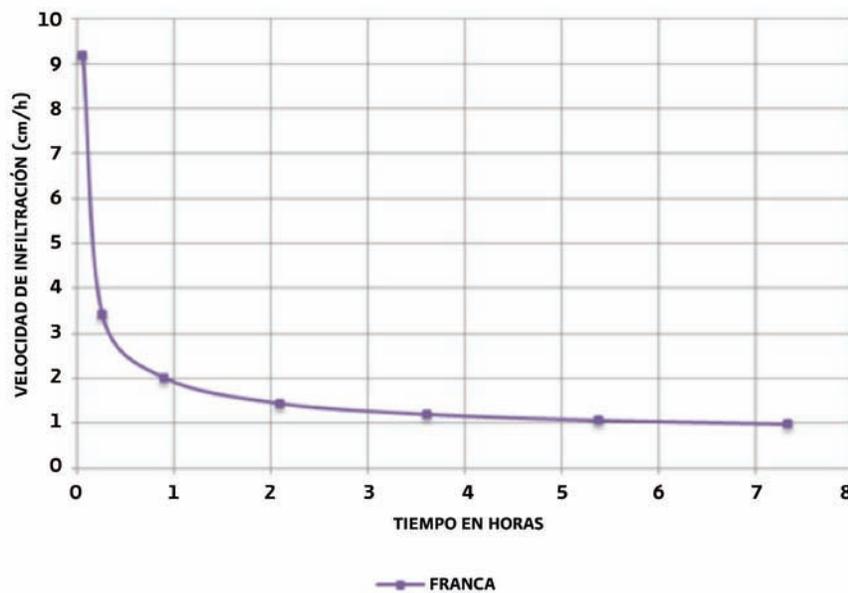


Figura 2.8. Curva de velocidad de infiltración del agua en suelo franco.

En la figura 2.8 se observa que debería utilizarse una precipitación efectiva de 1 cm/h para evitar que ésta supere a la velocidad de infiltración del agua en el suelo. También se observa que aproximadamente en siete horas se aplica una lámina de 7 cm sin encharcar, puesto que toda el agua que precipita efectivamente se infiltra. En este suelo, si se aplica una intensidad de precipitación de 2 cm/h, prácticamente a la hora de riego el agua empieza a escurrir o encharcar.

La intensidad de aplicación se calcula tomando en cuenta el gasto emitido por el aspersor y el área de cobertura de la lluvia, de manera que la intensidad de la lluvia real es menor que la calculada debido al volumen del agua que se evapora y es arrastrado por el viento; esto sirve como factor de seguridad para no exceder la capacidad de infiltración del agua en el suelo.

2.1.4. Lámina de riego en aspersión

En la producción de los cultivos con los sistemas de riego, se acostumbra manejar láminas de riego en lugar de volúmenes de agua debido a la facilidad de hacer operaciones con menos cifras y facilitar comparaciones de cantidades de agua aplicadas a parcelas con superficies diferentes.

2.1.4.1. LÁMINA DE AGUA

En riego por aspersión se aplica agua en riegos de presiembra o de siembra con suelo sin cubierta vegetal, que pueden compactarse o erosionarse si no se aplica el tamaño de gota e intensidad de lluvia adecuados.

Para saber cuál es la cantidad de agua que debe aplicarse durante el riego de un cultivo, con un sistema de aspersión, es necesario considerar cuánta agua puede almacenar el suelo y cuánta le falta para llenar el almacén aprovechable; además, se requiere tomar en cuenta las pérdidas por arrastre y evaporación, y también la lámina de agua percolada. No deben planearse pérdidas por escurrimiento.

Para medir las cantidades de agua que deben proyectarse o reponerse en el riego se utiliza el concepto de “lámina de agua” y corresponde a la altura teórica que alcanza un volumen de agua sobre una superficie plana a nivel y unitaria. Por ejemplo, 100 litros de agua se vierten sobre una superficie plana de un metro cuadrado, luego la altura que alcanzaría el agua sería de 0,10 m, 10 cm o 100 mm; esto significa que un litro de agua por metro cuadrado equivale a un milímetro de lámina.

$$LR = \frac{100 \text{ l}}{1 \text{ m}^2} = \frac{100 * 10 * 10 * 10 \text{ cm}^3}{10000 \text{ cm}^2} = 10 \text{ cm} = 100 \text{ mm}$$

2.1.4.2. LÁMINA DE AGUA APROVECHABLE EN LOS SUELOS

La lámina de agua aprovechable corresponde a la diferencia de las láminas que representan a capacidad de campo y el porcentaje de humedad a marchitamiento permanente.

De acuerdo con su textura, los suelos tienen diferentes contenidos de humedad aprovechable. En el cuadro 2.1 se presenta la lámina de agua aprovechable que corresponde a cada textura, en centímetros por metro de espesor del suelo. (No toma en cuenta materia orgánica ni estructura del suelo).

Cuadro 2.1. Almacenamiento de agua aprovechable en suelos.

TEXTURA	LÁMINA APROVECHABLE cm/m
Arcilla	13
Arcilla limosa	15
Arcilla arenosa	11
Franco arcillo limosa	16
Franco arcillosa	16
Franco arcillo arenosa	08
Franca	11
Franco limosa	16
Limo	19
Franco arenosa	09
Arena francosa	06
Arena	05

2.1.4.3. LÁMINAS DE RIEGO NETA Y BRUTA

La lámina de riego neta de proyecto se define como la altura de agua necesaria para satisfacer el requerimiento de riego del cultivo, y la lámina de riego bruta de proyecto se define como la altura de agua necesaria para almacenar, conducir y aplicar el agua al nivel de parcela. Esta cantidad incluye la lámina de evapotranspiración del cultivo, la lámina de control de sales y las láminas correspondientes a las pérdidas de arrastre y evaporación, percolación, conducción, almacenamiento y escurrimiento; también toma en cuenta las aportaciones de lluvia, manto freático y rocío.

Es importante aclarar que no debe aceptarse que se proyecte aplicar láminas de riego que originen déficit de lámina en alguna parte de la parcela. Esto se debe a que hay técnicos que consideran aplicar la lámina media de los aspersores como la lámina neta y, por lo tanto, aplican una lámina que compensa los déficits en la mayoría de los aspersores, con los excesos que aplica una minoría de los mismos. No toman en cuenta que, generalmente, la distribución de la emisión hidráulica no corresponde a una distribución normal.

La lámina de riego neta se calcula con la fórmula siguiente:

$$LR_n = (CC - CHA) * ES$$

LR_n – Lámina de riego neta (cm).

CC – Contenido de humedad a capacidad de campo relativo a volumen (decimal).

CHA – Contenido de humedad actual del suelo en el espesor considerado (decimal).

ES – Espesor de suelo que se requiere humedecer (cm).

La lámina de riego bruta en los sistemas de riego que no tienen obra de almacenamiento, se calcula con la fórmula siguiente:

$$LR_b = \frac{LR_n}{E_c * E_a}$$

LR_b – Lámina de riego bruta (cm).

LR_n – Lámina de riego neta medida o de proyecto (cm).

E_c – Eficiencia de conducción determinada en operación el sistema de riego (decimal).

E_a – Eficiencia de aplicación determinada en campo (decimal).

En el riego por aspersión no debe olvidarse incluir las pérdidas de agua por arrastre y evaporación, que se presentan en la lluvia que genera el aspersor.

Para calcular cuánta agua aplicar en tiempo real en riego por aspersión (fija, portátil manual y mecanizada), es necesario conocer cuánta agua le falta al suelo para llenarlo hasta capacidad de campo y tomar en cuenta las eficiencias de aplicación y de conducción.

Para calcular láminas en proyectos se puede usar el procedimiento de cálculo siguiente: a) se define la textura del suelo o se considera la textura al tacto; b) se obtiene la lámina aprovechable por metro de espesor de suelo del cuadro 2.1; c) esta lámina se multiplica por el espesor de suelo considerado por humedecer, obteniéndose la lámina total aprovechable. Cuando se riega para sembrar en húmedo o se siembra en seco y se riega, se considera que es el primer riego del ciclo de cultivo y se aplica la lámina correspondiente a toda la humedad aprovechable; cuando es riego de reposición de humedad consumida por el cultivo se considera riego de auxilio, se selecciona el factor de abatimiento o porcentaje de agua que se consume de la aprovechable y se calcula la lámina neta de riego por reponer; si no se tiene información, se puede usar el 50 % de la aprovechable.

2.1.5. Aspersión y salinidad

Para hacer un buen uso del riego por aspersión, se necesita tomar en cuenta la composición química del agua, la cantidad de sales en solución, las condiciones de salinidad en el suelo y la textura del mismo.

Los aspectos principales de regar con aguas salinas son los siguientes:

Toxicidad y deshidratación en las plantas. El problema principal de regar cultivos por aspersión con aguas salinas es que el follaje de los cultivos puede afectarse por la presión osmótica del agua o por su toxicidad. Las yemas, flores y frutos se afectan por iones tóxicos o por las sales solubles. La presencia de iones como cloruros, sodio y boro pueden provocar toxicidad debido a la acumulación que se produce en semillas, tallos y hojas. Además, cuando la concentración de sales solubles es alta y la presión osmótica del agua supera la presión osmótica de las células, al entrar en contacto con yemas, flores y hojas, les quita agua y produce deshidratación directa o pérdida de turgencia. En el caso de las yemas y de las flores es más fuerte el efecto.

La absorción de agua en el follaje y su toxicidad en las plantas ocurren durante periodos de tiempo con humedad relativa menor de 35%, con altas temperaturas y presencia de viento. Los cultivos sensibles al cloro y al sodio son los que se pueden afectar más fácilmente. Para reducir los efectos de toxicidad en las hojas por el agua asperjada, se recomienda regar de noche, y evitar el riego durante la presencia de vientos secos y cálidos. Además, los movimientos de tuberías con aspersores deben hacerse en la dirección más apegada a la del viento para que lave las hojas mojadas por transporte de gotas de la posición anterior. También, usar aspersores de giro rápido, aplicar intensidades altas de lluvia sin encharcar y riego con gotas grandes sin que originen problemas de escurrimiento por compactación del suelo.

Sodicidad del suelo. La existencia de ion sodio y su acumulación en el suelo origina problemas de pérdida de estructura en suelos de textura franca a arcillosa, reduciendo su permeabilidad, por lo que en esos suelos no se puede utilizar el riego por aspersión. Los suelos de textura desde franca hasta arenosa son indicados para regar con aspersión. Donde la capacidad de intercambio químico es media o pequeña (suelos arenosos) no se puede adsorber el sodio fácilmente y se lavan las sales con láminas de agua de riego en exceso.

Control de humedad del suelo. En general, para lograr altos rendimientos en suelos ligeramente salinos, se necesita que la capa superficial, donde se encuentran las raíces de las plantas, se mantenga a un nivel de humedad fácilmente aprovechable y así evitar altos esfuerzos de humedad en el suelo debidos a efectos de presión osmótica que reduzcan la absorción del agua por las plantas. Esto se facilita si el riego se realiza con los sistemas de riego por aspersión.

Para tomar en cuenta la calidad del agua y el criterio de salinidad, se debe calcular el exceso de agua de riego necesaria para mantener un contenido adecuado de sales en el suelo, con la finalidad de evitar la reducción de la producción del cultivo por los efectos de salinidad. Este exceso debe agregarse al requerimiento de riego.

También se requiere conocer la calidad del agua de riego y el contenido de sales solubles para determinar las condiciones en las que se puede trabajar con buena productividad y, por lo tanto, deben conocerse el factor de lavado y la lámina de sobrerriego, que debe adicionarse al requerimiento de riego.

Se encontró una relación entre la productividad de un cultivo y la salinidad en el extracto de la solución del suelo, que se representó con la ecuación siguiente:

$$PC_s = 100 - b * (CE_{es} - a)$$

PC_s – Productividad del cultivo bajo condiciones de salinidad (%).

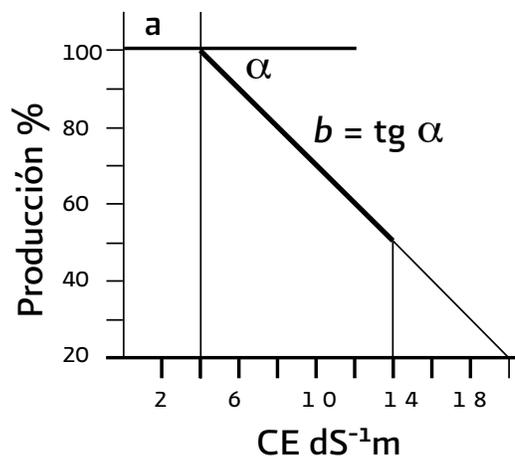


Figura 2.9. Relación de salinidad y producción de los cultivos.

a y b – Factores del cultivo.

CE_{es} – Conductividad eléctrica del estrato a saturación del suelo.

La ecuación se representa gráficamente como se muestra en la figura 2.9.

Además, las láminas de riego con lámina de lavado para control de la salinidad se calculan con la fórmula siguiente:

$$L = \frac{RR}{(1 - FL)}$$

L – Lámina de riego ajustada con el factor de lavado (cm).

RR – Requerimiento de riego (cm).

FL – Factor de lavado (decimal).

$$FL_{rn} = \frac{CE_r}{(5CE_{zr} - CE_r)}$$

$$FL_{rf} = \frac{CE_r}{2 * (CE_{zr})_{\text{máx}}}$$

FL_{rn} – Factor de lavado en riego normal (decimal).

FL_{rf} – Factor de lavado en riego frecuente (decimal).

CE_r – Conductividad del agua de riego (ds/cm).

CE_{zr} – Conductividad del agua en la zona de las raíces (ds/cm).

2.1.6. Requerimiento de riego

La necesidad o requerimiento de riego teórico mensual es la cantidad de agua que debe suministrarse al cultivo para su desarrollo sano, y corresponde a la suma de las cantidades mensuales de agua transpirada y evaporada del cultivo y del suelo, la cantidad aprovechada para la formación de tejidos, el volumen necesario para el control de la salinidad, menos las aportaciones de lluvia efectiva, del manto freático y del rocío.

$$V_{rr} = V_{tr} + V_{es} + V_{tej} + V_{cs} - V_{lle} - V_{mf} - V_{ro}$$

V_{rr} – Volumen de agua requerido para el riego (Mm^3).

V_{tr} – Volumen necesario para la transpiración del cultivo (Mm^3).

V_{es} – Volumen necesario para la evaporación del suelo cultivado (Mm^3).

V_{tej} – Volumen necesario para la formación de tejidos (Mm^3).

V_{cs} – Volumen necesario para el control de sales (Mm^3).

V_{lle} – Volumen aprovechado de la lluvia o lluvia efectiva (Mm^3).

V_{mf} – Volumen aportado por el manto freático (Mm^3).

V_{ro} – Volumen aportado por el rocío (Mm^3).

Es importante conocer el concepto teórico del requerimiento de riego y sus componentes, con la finalidad de interpretar las diferentes simplificaciones que se pueden hacer a la fórmula, perdiendo un mínimo de precisión.

En la práctica, los volúmenes de agua correspondientes a transpiración, evaporación y formación de tejidos son difíciles de medir por separado en los campos de riego, por lo que generalmente se hace a nivel de investigación.

También es complicado cuantificar las aportaciones de manto freático, **y de rocío, por lo que** estos conceptos y los anteriores se han incluido en un solo término denominado “evapotranspiración del agua por los cultivos”. Éste se puede estimar calibrando en campo con modelos de evapotranspiración y utilizando mediciones de humedad en el suelo, para medir el requerimiento de riego del suelo explorado por las raíces del cultivo y considerarlo como la evapotranspiración del cultivo en el periodo considerado entre riegos.

Donde no hay aportaciones naturales de agua durante el ciclo del cultivo, como son la lluvia, el rocío y las aportaciones de manto freático o de flujo subterráneo, el consumo de agua por

los cultivos más el volumen requerido para control de la salinidad es igual al requerimiento de riego. Si se considera el concepto por unidad de superficie, se puede expresar en láminas:

$$L_{rr} = L_{et} + L_{cs}$$

L_{rr} – Requerimiento de riego (m^3).

L_{et} – Volumen evapotranspirado + volumen de formación de tejidos (m^3).

L_{cs} – Volumen de control de sales (m^3).

En conclusión, cada caso debe analizarse específicamente para definir los factores que intervienen en la fórmula y aplicarla de acuerdo con los factores involucrados.

Actualmente hay procedimientos para determinar el consumo de agua de los cultivos y el agua que se aprovecha de la lluvia con diferentes alternativas, utilizando el programa *CROPWAT* publicado y diseminado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). En este trabajo se utilizó dicho sistema para realizar cálculos de requerimiento de riego por el método de la evapotranspiración de referencia y de la lluvia aprovechable, en un ejemplo de evaluación agronómica de un sistema de riego por aspersión.

También, la fórmula para calcular la cantidad de agua necesaria para control de sales se presentó en la sección correspondiente a salinidad y aspersión, y se aplicó en el ejemplo de evaluación agronómica de un sistema de riego por aspersión portátil.

2.1.7. Aportaciones del manto freático

El requerimiento de riego puede reducirse en los cultivos de las zonas con mantos freáticos con profundidades menores a 2 m, debido a las aportaciones que se generan por el flujo capilar hacia la zona de las raíces del suelo.

Las aportaciones del manto freático dependen de su profundidad y de la textura del suelo, debido a las diferencias de tamaños de los poros capilares. El flujo se establece inicialmente por las fuerzas capilares y, después, el gradiente hidráulico se genera por la extracción de agua de la zona de las raíces, por la evaporación directa del suelo o por la evapotranspiración del cultivo.

Las aportaciones del manto freático son aprovechadas para el consumo de agua del cultivo reduciendo el requerimiento de riego. Con la finalidad de dar una idea de las aportaciones que pueden generar algunos suelos, se presenta a continuación la figura 2.10.

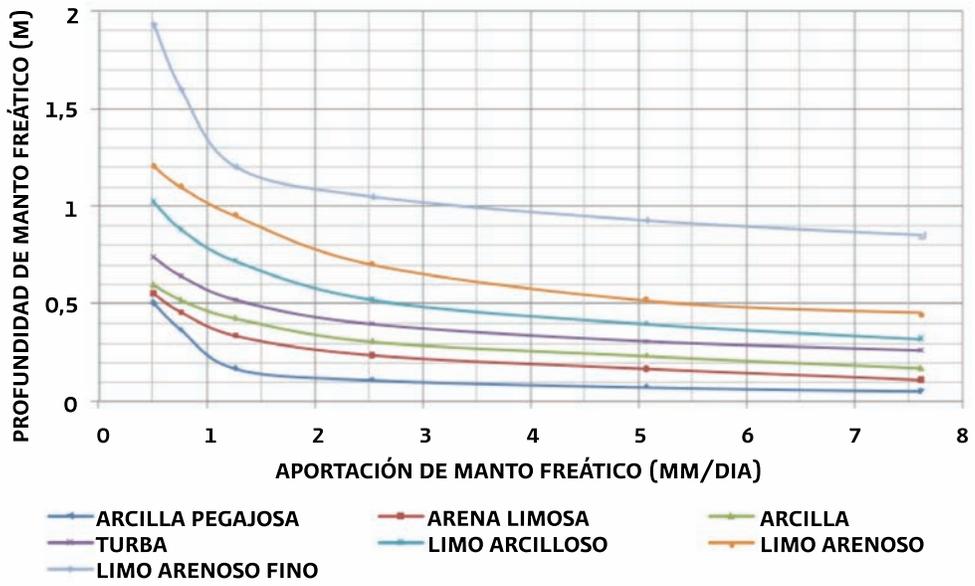


Figura 2.10. Aportación de agua del manto freático a la zona de las raíces por flujo capilar. Gráfica adaptada de Doorenbos y Pruitt, 1977.



En las mediciones de hidráulicas se usan los aforos en la descarga de los aspersores para determinar la uniformidad de distribución hidráulica.

3.1. Población, individuo y muestra

3.1.1. Población

Para caracterizar cuantitativamente un riego aplicado por aspersión en una parcela, se utiliza como parámetro de referencia la lámina precipitada de lluvia captada durante el riego en una superficie unitaria.

La población en estudio es toda la superficie de la parcela dominada por el sistema de riego por aspersión. Las superficies de las secciones del sistema son subconjuntos de la población y cada uno de estos se forma por individuos. Cada superficie unitaria en que se divide la superficie total del sistema de riego, se considera representada por la lámina captada en un pluviómetro.

3.1.2. Individuo

La lámina precipitada de la lluvia, captada en un pluviómetro, es la altura teórica que alcanzaría el agua de la lluvia precipitada en la superficie del pluviómetro. La lámina se toma como parámetro de caracterización de cada superficie unitaria regada por aspersión y, ésta, se considera como un individuo de la población.

3.1.3. Muestra

En general, caracterizar las poblaciones resulta muy laborioso y costoso, por lo que generalmente seleccionamos un subconjunto de la población o muestra; sin embargo, es necesario recalcar que debe ser suficientemente representativo de las características de la población.

3.2. Medida de tendencia central

3.2.1. Media

Media aritmética simple. Representa los valores característicos de los individuos de la población o de la muestra. Se calcula sumando cada valor o parámetro que caracteriza a los individuos de la muestra o de la población, y se divide por el total de datos de la muestra:

$$X_m = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_{(n-2)} + X_{(n-1)} + X_n}{n}$$

Donde:

X_m – Media aritmética o promedio de la lámina precipitada (mm).

X_i – Valores de la precipitación (mm).

n – Número de datos o valores.

3.2.2. Media ponderada

Media ponderada. Caracteriza los valores de los individuos de la población o de la muestra, cuando se presentan factores que influyen cuantitativamente asociados a los valores de los individuos y deben ser considerados para que sea representativa.

Gasto medio de secciones de riego de diferentes superficies.

$$Q_{med} = \frac{Q_1 * A_1 + Q_2 * A_2 + \dots + Q_n * A_n}{A_{total}}$$

Q_{med} – Gasto medio de secciones de riego (l/s).

Q_i – Gastos de cada sección (l/s).

A_i – Área de las secciones (ha).

A_{total} – Área total (ha).

n – Número de observaciones.

Presión media de secciones de riego de diferentes superficies.

$$P_{med} = \frac{P_1 * A_1 + P_2 * A_2 + \dots + P_n * A_n}{A_{total}}$$

P_{med} – Presión media de las secciones de riego (kg/cm²).

P_i – Presión de cada sección (kg/cm²).

A_i – Área de las secciones (ha).

A_{total} – Área total (ha).

n – Número de observaciones.

Lámina media de secciones de riego de diferentes superficies.

$$L_{med\ pond} = \frac{L_1 * A_1 + L_2 * A_2 + \dots + L_n * A_n}{A_{total}} = \frac{\sum_1^n (L_i * A_i)}{\sum_1^n A_i}$$

$L_{med\ pond}$ – Presión media de las secciones de riego (kg/cm²).

P_i – Presión de cada sección (kg/cm²).

A_i – Área de las secciones (ha).

A_{total} – Área total (ha).

n – Número de observaciones.

3.2.3. Mediana

Es el valor que se encuentra exactamente en la mitad del conjunto de datos después que las observaciones se han ubicado en serie ordenada de mayor a menor. Esta medida nos indica que la mitad de los datos se encuentra por debajo de este valor y la otra mitad por encima del mismo. Cuando el número de datos es non, la mediana es el valor central, y cuando es par, el número de orden de la mediana es el número de observaciones más uno entre dos.

3.2.4. Moda

La moda es el valor que más veces se repite dentro de los datos; es decir, si tenemos la serie ordenada (4, 4, 5 y 7), el valor que más veces se repite es el número 4, el cual es la moda de los datos. Es posible que en algunas ocasiones se presenten dos valores con la mayor frecuencia, lo cual se denomina “bimodal” o, en otros casos, más de dos valores, lo que se conoce como “multimodal”. En algunos problemas se usa el agrupamiento por clases y la clase que tenga más elementos corresponde a la clase modal y, en ese caso, se considera la moda como el valor medio de la clase.

3.3. *Medidas de dispersión*

A continuación, se describen y presentan fórmulas de los parámetros estadísticos siguientes: rango, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación.

3.3.1. Rango

Mide la amplitud de los valores de la muestra y se calcula por la diferencia entre el valor más elevado y el valor más bajo.

3.3.2. Varianza

Para caracterizar la dispersión de los datos, se trató de usar el promedio de las desviaciones de cada individuo respecto a la media, y como no se puede calcular el promedio real de las desviaciones de cada valor de una población y su media porque la suma de las desviaciones es cero, entonces se propuso la opción de calcular el promedio de los valores absolutos de las desviaciones de los datos respecto a su media; sin embargo, en la práctica estadística se le dio mayor peso a la desviación típica o estándar, que se tratará en el siguiente punto.

La siguiente opción fue obtener la media aritmética de las desviaciones con respecto a la media de la población, elevadas al cuadrado para eliminar el problema del signo; sin embargo, se cambió el indicador numérico real por un valor subjetivo al elevar al cuadrado cada diferencia. A este parámetro se le denominó “varianza”.

La varianza se calcula como la sumatoria de los cuadrados de las diferencias entre cada valor de una población y su media. La suma obtenida se divide por el tamaño de la población.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{n}$$

S^2 – Varianza de la población.

X_m – Media aritmética o promedio.

X_i – Valores de la variable X .

n – Número de datos o valores.

La varianza siempre será mayor que cero. Mientras más se aproxima a cero, más concentrados están los valores de la serie alrededor de la media. Por el contrario, mientras mayor sea la varianza, más dispersos están.

Cuando se trata de hacer estimaciones de la varianza con datos de una muestra, se utiliza (n-1) en lugar de (n) en el denominador de la fracción en la fórmula y quedan como se presentan a continuación:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{n - 1}$$

S^2 – Varianza de la muestra.

X_m – Media aritmética o promedio.

X_i – Valores de la variable X .

n – Número de datos o valores.

3.3.3. Desviación típica o estándar

Con la finalidad de tener un parámetro estadístico que representara el promedio de las desviaciones con respecto a la media, del orden numérico correspondiente al real, se propuso la desviación típica o estándar. La desviación típica o estándar de la población se calcula como raíz cuadrada de la varianza.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{n}}$$

S – Desviación típica o estándar de la población.

X_m – Media aritmética o promedio de la población.

X_i – Valores de la variable X .

n – Número de datos o valores.

Cuando se trata de hacer estimaciones de la desviación estándar de una población con datos de una muestra, se utiliza (n-1) en lugar de (n) en el denominador de la fracción en la fórmula y queda como se presentan a continuación:

S – Desviación típica o estándar de la muestra.
 X_m – Media aritmética o promedio de la muestra.
 X_i – Valores de la variable X .
 n – Número de datos o valores.

En una población con distribución normal, si se considera el límite inferior representativo, como: la media menos la desviación estándar, y el límite superior como la media más la desviación estándar, estos límites incluyen el 68% de los datos de la población, y si fueran dos veces la desviación estándar incluirían el 95% de los datos de la población.

3.3.4. Coeficiente de variación

Se calcula como el cociente de dividir la desviación típica entre la media de la población o de la muestra. Se puede representar como porcentaje o como decimal, según sea el interés de uso.

$$CV = \frac{S}{X_m} * 100$$

CV – Coeficiente de variación (%).
 S – Desviación típica o estándar de una muestra.
 X_m – Media aritmética o promedio de la muestra.

El aspecto interesante del coeficiente de variación es que, al ser un porcentaje o decimal, el indicador es adimensional, y permite comparar el nivel de dispersión de dos muestras. Esto no ocurre con la desviación típica, ya que viene expresada en las mismas unidades que los datos de la serie.

3.4. Distribución de frecuencias

En riego por aspersión es muy importante considerar que se manejan dos tipos de datos. Por un lado, se tiene la lluvia que se genera con los aspersores y se mide con pluviómetros y, por otro lado, la descarga de los aspersores de una tubería regante o en una sección que depende de su funcionamiento hidráulico y de sus componentes.

3.4.1. Distribución de frecuencias simétrica

Generalmente, la lluvia de los aspersores captada en recipientes o pluviómetros se comporta de manera aleatoria y tiene distribución simétrica; es decir, la media, la mediana y la moda tienden a ser similares, y el número de datos menores y mayores que la media tienden a ser iguales.

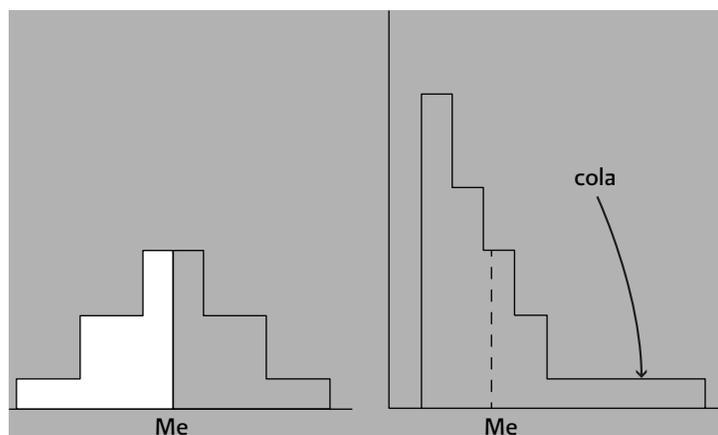


Figura 3.1. Distribuciones de frecuencias simétricas y asimétricas.

A continuación, se presentan datos de pluviometría de un aspersor, su media, mediana y su moda (obtenida formando clases para agrupar datos).

Cuadro 3.1. Datos de pluviometría de un aspersor, con efecto ligero del viento.

C	1	2	3	4	5	6	7	8
1	6.3	19.9	41.9	47.9	51.9	45.9	41.9	23.9
2	6.3	20.4	40.8	49.5	56.9	53.9	36.9	20.4
3	7.1	21.9	41.9	51.9	61.8	61.8	31.9	17.0
4	7.1	21.2	38.5	47.1	62.8	61.8	30.9	18.0
5	6.3	19.9	31.9	43.9	63.8	61.8	29.9	19.0

De estos datos se obtuvieron:

Media = 35.60.

Mediana = 37.70.

Se agruparon los datos en clases y se encontró que:

Moda = 45.

De estos resultados, se puede interpretar que la media y la mediana tienden a ser iguales, y que la moda por clases se cargó a un valor mayor debido al efecto del viento.

Se calculó que el 47.5% de los datos fue menor que la media, por lo que se concluye que la muestra tiende a ser simétrica y que los parámetros estadísticos son confiables.

Para obtener la moda se formó un cuadro de datos con frecuencias de precipitaciones cada 10 mm de lluvia, aproximadamente. En el cuadro se observa que la moda resultante fue la clase 40.1-50.0.

Cuadro 3.2. Frecuencias de precipitaciones obtenidas de la lluvia de un aspersor.

CLASE	FRECUENCIA
0.1-10.0	5
10.1-20.0	5
20.1-30.0	6
30.1-40.0	5
40.1-50.0	9
50.1-60.0	4
60.1-70.0	6

3.4.2. Distribución de frecuencias asimétrica

Las descargas en tuberías presurizadas a nivel, se generan por diferencias de presiones y dependen de la función de gasto-carga, por lo que se genera un sesgo hidráulico y no puede considerarse un fenómeno aleatorio. Esto genera una distribución de frecuencias asimétrica, en la que la media, mediana y moda son diferentes, por lo que se deben aplicar parámetros estadísticos con las consideraciones especiales para su interpretación.

Cuadro 3.3. Gastos de una tubería de riego por aspersión a nivel, calculada con datos de un aspersor y diámetro de tubería regante.

NÚMERO	GASTO (l/s)	NÚMERO	GASTO (l/s)	NÚMERO	GASTO (l/s)
1	0.354	10	0.282	19	0.254
2	0.343	11	0.277	20	0.253
3	0.333	12	0.272	21	0.252
4	0.324	13	0.268	22	0.251
5	0.315	14	0.265	23	0.251
6	0.307	15	0.262	24	0.25
7	0.3	16	0.259	25	0.25
8	0.293	17	0.257	26	0.25
9	0.287	18	0.255	27	0.25

De estos datos se obtuvieron:

Media = 0.278.

Mediana = 0.265.

Se agruparon los datos en clases y se encontró que:

Cuadro 3.4. Frecuencias de gastos en una tubería de riego por aspersión.

CLASE	FRECUENCIA
0.250-0.260	12
0.261-0.270	3
0.271-0.280	2
0.281-0.290	2
0.291-0.300	2
0.301-0.310	1
0.311-0.320	1
0.321-0.330	1
0.331-0.340	1
0.341-0.350	1
0.351-0.360	1

Moda = 0.255.

De estos resultados se puede interpretar que la media y la mediana tienden a ser diferentes, y que la moda por clases se cargó completamente a un valor menor debido al efecto producido por el mayor número de aspersores con menor presión generado por las pérdidas de energía del agua en la tubería. Se calculó que 62.9% de los datos fue menor que la media, por lo que se concluye que la muestra tiende a ser asimétrica y que los parámetros estadísticos de tendencia central no son confiables, así que deben usarse alternativas que tomen en cuenta esto.

En los cuadros de frecuencias, se observa claramente el efecto de la simetría en el caso de la precipitación, o de la asimetría en el caso de los gastos descargados en una tubería de riego por aspersión.

3.5. Ejemplos de estadística aplicada en aspersión

3.5.1. Ejemplo 1. Análisis estadístico de la lluvia de un aspersor operando individualmente y con traslapes de lluvia, generados con la precipitación del mismo aspersor

Se realizó una prueba con un aspersor individual durante una hora y se utilizó una cuadrícula de 14x14 pluviómetros, espaciados 2 m entre sí. Los volúmenes captados se presentan en el cuadro 3.5.y en la figura 3.2. Se requiere conocer: la variación de la media, de la varianza, de la desviación estándar, del coeficiente de variación y su relación con la uniformidad de riego al variar los traslapes del aspersor.

Cuadro 3.5. Volúmenes (cm³) captados en la prueba de un aspersor individual en cuadrícula, con espaciamientos de 2 m entre pluviómetros.

C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0.00	0.00	0.00	1.18	1.65	1.88	2.36	2.12	1.73	1.57	0.94	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	1.96	5.11	7.15	9.90	11.94	12.33	9.27	6.83	4.63	1.81	0.00	0.00
3	0.00	0.00	4.56	8.17	11.47	16.89	21.60	21.44	16.41	12.10	7.70	4.79	0.00	0.00
4	0.00	6.60	10.76	13.82	20.81	23.95	27.33	27.49	23.56	20.42	12.80	9.03	5.03	0.00
5	1.18	5.11	10.37	17.36	24.74	30.71	34.87	35.42	30.39	24.43	17.20	10.60	5.50	0.79
6	1.88	11.00	19.24	23.17	31.65	37.86	43.20	43.59	39.43	33.85	26.15	20.11	10.60	1.49
7	2.36	11.39	18.46	26.47	35.11	42.80	46.65	46.26	41.08	34.79	29.37	20.03	10.60	1.96
8	2.12	11.23	18.30	26.31	34.16	42.96	46.34	46.10	39.03	34.56	25.53	18.46	12.41	2.51
9	1.96	9.74	20.42	21.52	29.85	40.06	43.59	43.04	39.03	34.16	23.17	18.46	10.45	1.96
10	1.18	5.89	12.17	18.46	25.53	31.97	38.41	38.25	32.67	26.86	17.67	13.74	8.95	1.26
11	0.00	5.65	9.97	13.43	19.79	24.74	31.02	30.79	25.45	19.95	11.86	7.46	5.03	0.00
12	0.00	1.26	5.81	8.80	12.25	17.28	22.54	22.31	16.81	12.02	6.83	4.24	0.00	0.00
13	0.00	0.00	3.14	5.97	8.17	9.82	12.25	12.10	9.58	7.70	5.03	2.51	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	1.10	1.57	2.12	2.75	2.51	1.96	1.49	0.94	0.00	0.00	0.00

En la figura 3.2 se observa el patrón circular del aspersor operando individualmente (Caso 1) y la gran variabilidad de los volúmenes captados por los recipientes. Se puede ver con toda claridad la necesidad de traslapar los volúmenes captados para mejorar la uniformidad de riego.

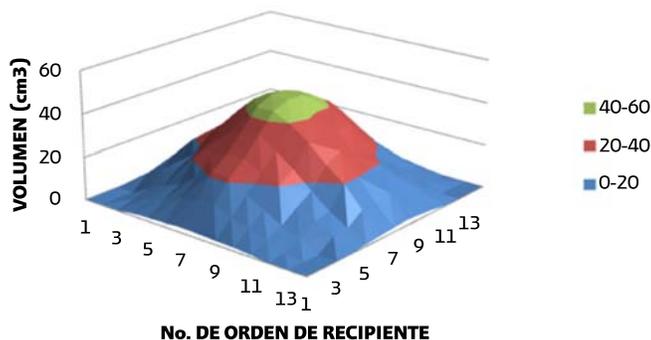


Figura 3.2. Distribución de la lluvia de un aspersor, funcionando individualmente y sin viento.

En la figura 3.3 se traslaparon las precipitaciones correspondientes a 16 aspersores, formando un cuadrado, y se puede ver que el área central contiene la zona de mayores precipitaciones con buena uniformidad; a los lados, se observa el efecto de orilla. En este caso, se empieza a notar que la uniformidad de riego se puede controlar y que el efecto de orilla tiende a minimizarse.

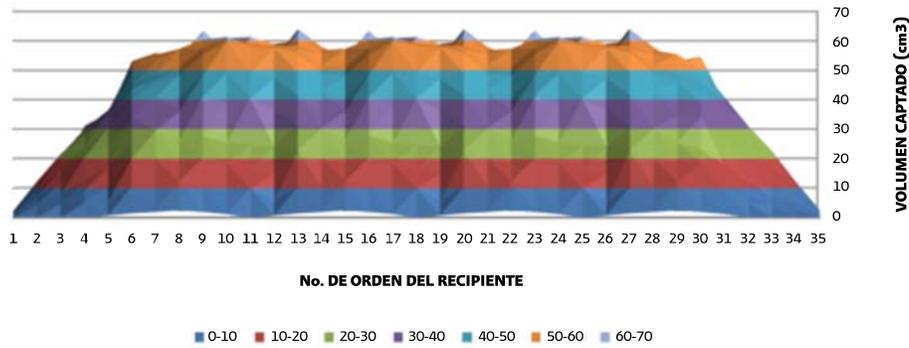


Figura 3.3. Perfil de la distribución de la lluvia de 16 aspersores, funcionando sin viento, en cuadro de 4 * 4 aspersores.

En la figura 3.4 se eliminaron las precipitaciones correspondientes a las orillas, y se puede ver sólo el área central con buena uniformidad. En este caso, se empieza a notar que la uniformidad de riego se puede controlar y que el efecto de orilla tiende a minimizarse mientras más grande es el área regada por los aspersores y menor proporción es ocupada por la orilla sin traslape.

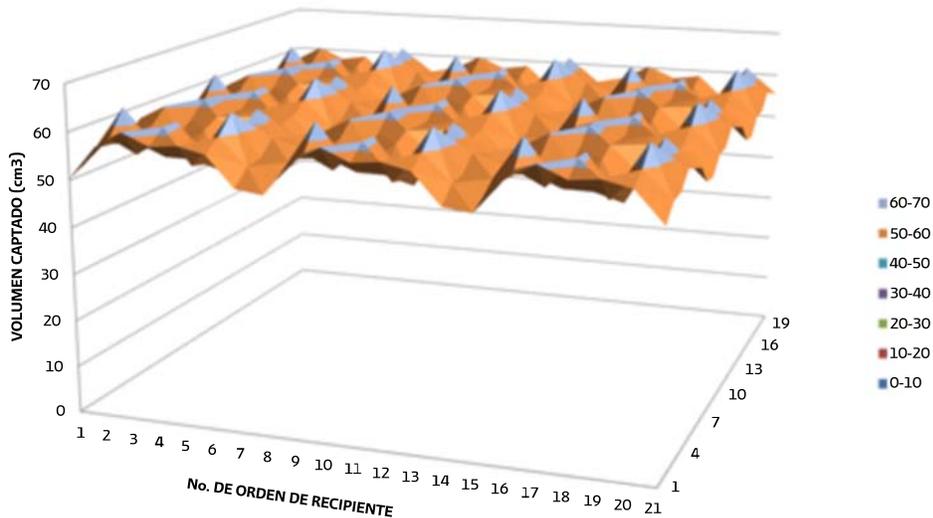


Figura 3.4. Distribución de la lluvia de 16 aspersores, funcionando sin viento, en cuadro de 4 * 4 aspersores sin la lluvia de las orillas.

Ya analizados gráficamente los tres casos, se observa en el cuadro 3.4 que en los parámetros estadísticos, al considerar más aspersores, la lámina media tiende a subir (debe llegar a tender a un límite que es el Caso 3, donde no hay efecto de orilla). Esto se debe a que al traslaparse la lluvia se incrementa el agua captada en un mismo sitio, por lo que la media debe ser mayor entre más aspersores traslapen la lluvia sobre ese mismo punto.

En los primeros dos casos, el efecto de orilla genera valores de la varianza y de la desviación estándar altos; sin embargo, cuando llega a 16 aspersores sin efecto de orilla, se obtienen los valores de dispersión más bajos. En el caso del coeficiente de variación, que es un indicador de la desviación correspondiente a la media, es claro que tiende a ser menor, indicando mayor homogeneidad en los volúmenes captados en los recipientes, entre menor es el coeficiente de variación de la información de las muestras.

En el cuadro 3.6 se observa que en el Caso 1 la media y sus parámetros de dispersión son menores que en los Casos 2 y 3. Esto se debe a que sólo se consideró una hora de lluvia y con traslapes se consideraron dos horas de lluvia.

Cuadro 3.6. Parámetros estadísticos correspondientes a los cinco casos de traslapes simulados con la información de un aspersor.

CONCEPTO	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Media	14.12	36.14	56.46
Varianza	184.73	446.45	12.45
Desviación estándar	13.59	21.13	3.53
Coeficiente de variación	96.28	0.58	0.06
Núm. aspersores	1	16	16

Para evitar efectos de orilla en las parcelas chicas deberá usarse aspersores de 180° en los lados y de 90° en las esquinas.

3.5.2. Ejemplo 2. Estudio estadístico de lluvia generada por una línea de aspersores

El sistema de riego está integrado por una tubería distribuidora y tres tuberías regantes portátiles que operan mediante hidrantes en cada posición, espaciados 18 m; la tubería de riego por aspersión tiene aspersores conectados cada 12 metros.

Como pluviómetros se utilizaron recipientes cilíndricos de 10 cm de diámetro interior y 15 cm de profundidad; el área de captación por recipiente fue de 78.5 centímetros cuadrados. Con la finalidad de hacer el análisis estadístico de la lluvia, se registraron los volúmenes captados de la lluvia en la prueba de riego por aspersión. Se muestreó un área comprendida entre tres posiciones de tubería regante, espaciadas entre ellas 18 m (largo) y los aspersores instalados estaban separados entre ellos 12 m (ancho). Para obtener la muestra se formó una cuadrícula de 60 puntos (12x5) a los lados de la posición central de la tubería regante y, en cada uno, se instaló un recipiente para captar la lluvia de la tubería regante (figura 3.5).

Caso 1. Tubería de aspersión operando sin traslapes

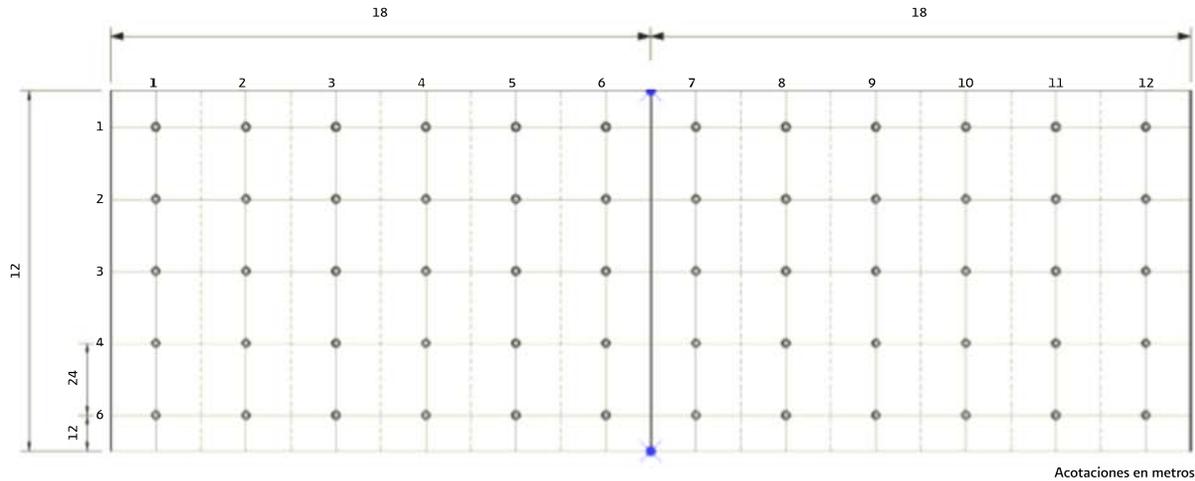


Figura 3.5. Distribución en campo de los recipientes o pluviómetros.

La tubería de riego operó una hora en la posición central y se obtuvieron los volúmenes que se presentan en el cuadro 3.7.

Cuadro 3.7. Volúmenes captados durante el riego en la posición central.

NÚM. ORDEN DE TRASLAPE	VOLUMEN CAPTADO Y SUMAS SIN TRASLAPE												
C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	SUMA
1	0	6.3	19.9	41.9	47.9	51.9	45.9	41.9	23.9	6.0	0.0	0.0	285.6
2	0.0	6.3	20.4	40.8	49.5	56.9	53.9	36.9	20.4	4.0	0.0	0.0	289.1
3	0.0	7.1	21.9	41.9	51.9	61.8	61.8	31.9	17.0	2.0	0.0	0.0	297.3
4	0.0	7.1	21.2	38.5	47.1	62.8	61.8	30.9	18.0	5.0	0.0	0.0	292.4
5	0.0	6.3	19.9	31.9	43.9	63.8	61.8	29.9	19.0	8.0	0.0	0.0	284.6
SUMA	0.0	33.0	103.5	195.0	240.2	297.2	285.3	171.6	98.2	24.9	0.0	0.0	1449.0

En la figura 3.6 se observa que la franja muestreada tiene los volúmenes captados más grandes a lo largo de la tubería, debido al traslape entre aspersores y que se reduce la precipitación hacia las orillas.

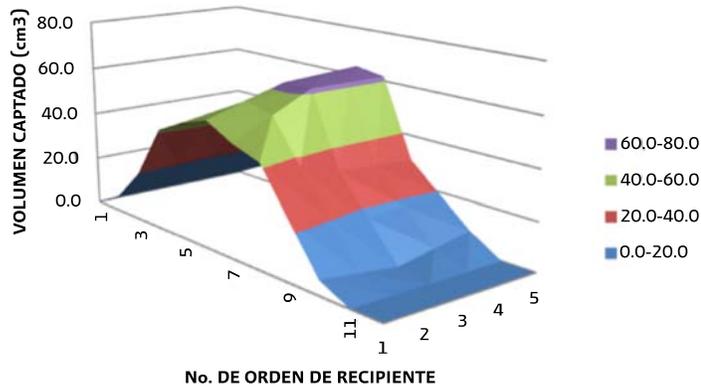


Figura 3.6. Distribución de la lluvia de una línea de aspersores, muestreando el área de influencia equivalente de un aspersor. Perspectiva.

También, se pueden observar que los valores máximos están en la zona central, los valores mínimos en las orillas y la uniformidad de riego es muy baja debido a que falta el traslape entre tuberías regantes. El riego, en estas condiciones, sería inaceptable.

Después de analizar gráficamente la información, se calcularon los parámetros estadísticos y se tiene para el Caso 1 que:

Aplicando la fórmula de la media aritmética, se obtiene:

$$X_m = \frac{1449.0}{60} = 24.1 \text{ cc}$$

Determinando el rango se tiene:

$$R = 63.8 - 0.0 = 63.8 \text{ mm}$$

Se aplicó la fórmula de la varianza y se obtuvo:

$$S^2 = 490.99$$

La desviación estándar es:

$$S = 22.16$$

El coeficiente de variación se calculó:

$$CV = \frac{22.16 * 100}{24.1} = 91.75$$

Caso 2. Cinco tuberías operando con cinco traslapes

También, se hace la consideración de incluir el traslape de cinco aspersores sobre la tubería regante y cinco posiciones de tuberías regantes para aumentar el área con traslapes y mejorar la uniformidad de riego. Se obtiene la precipitación como se muestra en la figura 3.7.

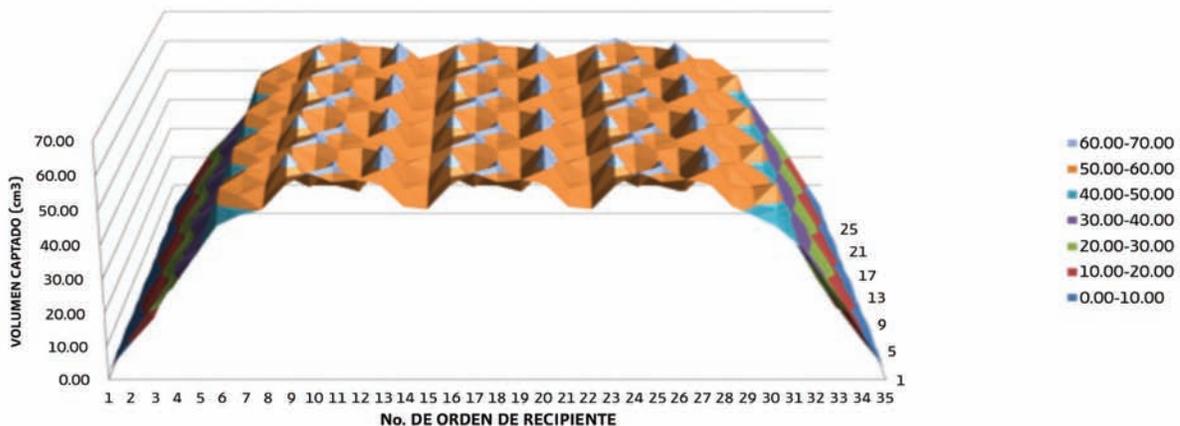


Figura 3.7. Volúmenes captados considerando traslapes, incluyendo cinco posiciones de aspersores sobre la tubería regante y cinco posiciones de tuberías regantes. Vista en dirección de las tuberías regantes.

Caso 3. Cinco tuberías traslapadas y cinco aspersores traslapados, sin tomar en cuenta la orilla sin traslapes

Con la finalidad de estudiar la uniformidad de la lluvia al considerar sólo área con traslapes, se seleccionó el Caso 2 y se eliminaron las dos orillas de la lluvia, por lo que quedó el área traslapada con alta uniformidad, como se aprecia en la figura 3.8.

Se procedió a calcular los parámetros estadísticos para realizar las comparaciones.

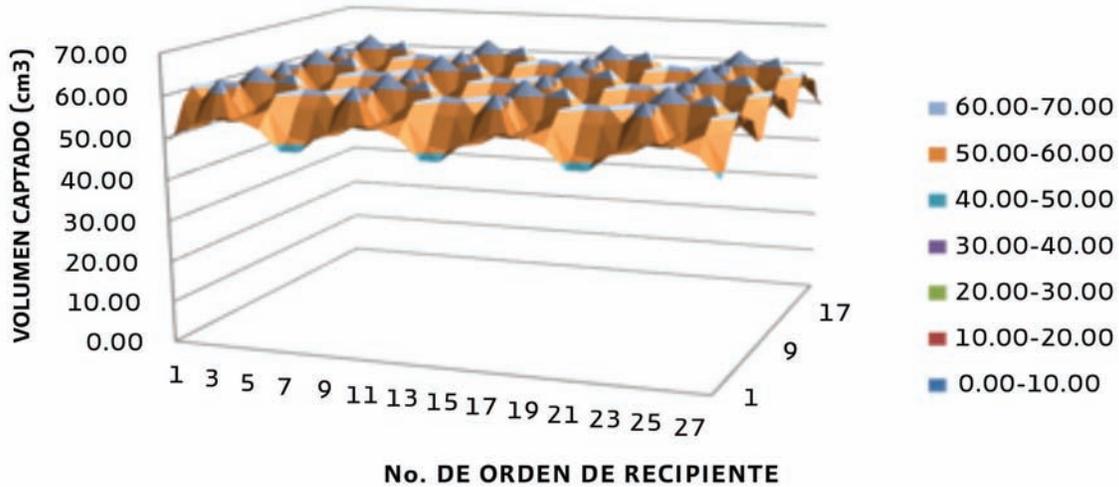


Figura 3.8. Volúmenes captados considerando traslapes, incluyendo cinco posiciones de aspersores sobre la tubería regante y cinco posiciones de tuberías regantes. Sin considerar las orillas.

Con sólo observar las figuras de distribución de la lluvia o de volúmenes captados, se infiere que la uniformidad de la lluvia aumenta conforme aumentan los traslapes, hasta el Caso 3, donde no se incluyen los datos de las orillas, y se observa directamente que ya se presenta buena uniformidad. Esta interpretación empírica ayuda a interpretar el orden de magnitud de los parámetros estadísticos.

En el cuadro 3.8 se presentan los resultados de cálculos estadísticos, obtenidos con un programa de cómputo:

Cuadro 3.8. Parámetros estadísticos de la evaluación de riego por aspersión de una tubería regante considerando cuatro casos de análisis.

CONCEPTO	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Media	24.1	45.17	56.07
Rango	63.8	62.44	13.04
Varianza	490.99	324.47	13.55
Desviación estándar	22.16	18.01	3.68
Coefficiente de variación	0.92	0.40	0.07

Análisis de la media. En el Caso 1 del riego sin traslape, la prueba duró una hora, por lo que el volumen medio captado fue 24.1 cm^3 . En el Caso 2, donde hay muchos valores tendientes a la media en el área central, se obtuvo cerca del doble que en el Caso 1, indicando que el efecto de orilla se redujo. En el Caso 3 la media del volumen corresponde a la precipitación promedio de un riego por aspersión en el área efectiva de riego, y se observa que el volumen aplicado no se afecta por el efecto de orilla; por lo tanto, sólo este caso realmente representa el volumen que corresponde al riego; es decir, sin los efectos de orilla.

Análisis del rango. En términos generales, en los dos primeros casos el rango no varió debido a que se tomaron en cuenta los valores extremos mínimos y máximos, y no es de utilidad para el análisis de este problema. Fue necesario considerar todos los valores de la precipitación incluyendo ceros, debido a que al traslapar se integrarían datos de lluvia. Sin embargo, en el Caso 3, el rango se redujo drásticamente a 13.04 debido a que se consideraron sólo los valores dentro del área de traslapes, sin efectos de orilla.

Análisis de la varianza. La varianza en el Caso 1 es muy grande debido a que las desviaciones con respecto a la media son grandes, y se observa en el Caso 2 que al aumentarse el área traslapada se reduce mucho. En el Caso 3, al no haber efecto de orilla, la varianza corresponde a un rango muy reducido, por lo que los volúmenes captados representan mejor el riego aplicado.

Análisis de la desviación estándar. La desviación estándar es una estimación de la desviación promedio de los datos respecto a la media. Al considerar la desviación estándar de los volúmenes captados para el riego de los cultivos, es evidente que no pueden aceptarse desviaciones tan grandes como en el Caso 1 sin traslape, porque casi iguala al valor de la media y, en el Caso 3, con traslape y sin efecto de orilla, la desviación estándar fue 15 veces menor que la media, lo que indica que se homogeneizó la población y mejoró la calidad de la distribución del agua.

Análisis del coeficiente de variación. El coeficiente de variación en porcentaje, es el porcentaje de la desviación respecto a la media. Esto es muy importante en riego porque las desviaciones negativas de los datos naturales respecto a la media, indican volúmenes menores aplicados al cultivo. Hay dos implicaciones: la primera es que las pruebas de uniformidad de lluvia deben realizarse donde se espera que los aspersores apliquen menos agua, o sea, en el cuarto bajo, para detectar déficits de riego y, la segunda, es que si se quiere compensar el déficit que existe por falta de uniformidad, debería aplicarse un exceso al menos igual al porcentaje indicado por el coeficiente de variación de la lluvia. En los dos primeros casos del ejemplo se pierde el sentido del coeficiente de variación porque las muestras no son representativas del riego y, en el Caso 3, si representa el riego ya se observa que la lluvia está bien distribuida porque el traslape es efectivo.

Del análisis comparativo de los parámetros estadísticos, se concluye que entre mayor es la superficie regada con traslapes de los aspersores y de las tuberías regantes, se riega más uniforme.

Es importante señalar que de acuerdo con la distribución en campo de la o las tuberías de riego, debe seleccionarse el sitio de muestreo, hacerse la consideración del traslape que debe ocurrir cuando se riega normalmente y simularlo para el análisis de la información.

3.6. Muestreo

El tipo de muestreo que se utiliza en los estudios de riego por aspersión es dirigido o determinístico; es decir, no es un muestreo probabilístico porque la elección de los elementos o individuos depende de las características del estudio y no es aleatoria. Esto implica que de acuerdo con algunos estadísticos no es posible hacer inferencias con los resultados del análisis del muestreo, sin embargo, de la muestra que se obtenga se debe hacer el análisis y llegar a conclusiones para el mejoramiento del sistema de riego, de ahí la importancia que tiene seleccionar bien los sitios de la muestra para evitar llegar a conclusiones falsas.

El muestreo en un sistema de riego por aspersión debe representar por una parte, la distribución hidráulica de la aplicación del agua en el campo, o sea, la descarga de los aspersores y por otra parte la distribución de la lluvia para determinar la uniformidad de precipitación o aplicación del agua al cultivo.

3.6.1. Objetivo del muestreo

El estudio que se realiza para la evaluación de un sistema de riego tiene las actividades siguientes: obtener y analizar información cuantitativa para conocer gastos hidráulicos, tiempos de riego, consumos de energía, cultivos, evapotranspiración, intervalos de riego, producción de los cultivos, superficies de riego, volúmenes extraídos o derivados, láminas de riego aplicadas, productividad del agua, eficiencias de riego y parámetros de desempeño de los sistemas de riego.

Como es muy costoso trabajar con toda la información que se puede obtener de los sistemas de riego, se requiere manejar el mínimo de información con el mínimo costo y con información de confianza, por eso, es necesario utilizar las técnicas de muestreo.

Por lo anterior, es necesario obtener información confiable y con el costo mínimo para realizar la evaluación de los sistemas de riego.

Uno de los objetivos del muestreo es obtener información para determinar la uniformidad de distribución hidráulica del sistema de riego. Para esto, deben considerarse las secciones de riego como unidades de evaluación y analizar la variación de la presión o de los gastos proyectados. Con los resultados de esta evaluación deben obtenerse las recomendaciones para mejorar el sistema de riego a nivel de puntos de control; es decir, abriendo o cerrando válvulas para establecer las presiones y los gastos de proyecto o de operación correcta.

Otro de los objetivos del muestreo es obtener información para determinar la uniformidad de descarga de los emisores en tuberías regantes o en secciones de riego. Con esta información se analizará la necesidad de usar diámetros mayores de tuberías, cambiar de boquillas en los aspersores u otros cambios. Mejorar el sistema, en este sentido, asegura que la uniformidad de distribución del agua es uniforme dentro de las secciones de riego o en las tuberías regantes.

Por último, debe tomarse en cuenta la uniformidad de aplicación entre las tuberías de riego y entre los aspersores para determinar los efectos específicos de la uniformidad de la lluvia

sobre el terreno o el cultivo, y con los resultados deben tomarse decisiones de cambiar los espaciamientos entre regantes y entre aspersores. También puede ser necesario cambiar boquillas o aspersores, dependiendo del gasto y la presión disponible del equipo de bombeo.

3.6.2. Tamaño de muestra

El tamaño de muestra dependerá básicamente del costo y del tiempo disponible, y debe tomarse en cuenta que el número de muestras influye en la precisión que se obtenga en el estudio. Para que sea representativo el muestreo, es necesario interpretar los desniveles topográficos y las pérdidas de energía en las tuberías, para tomar en cuenta los gradientes que se generan en cada sistema de riego por aspersión. Por esta razón, son muy importantes los conocimientos de hidráulica y topografía del evaluador. En el caso de que el evaluador no sea experto en riego presurizado, debe seguir los procedimientos de muestreo recomendados para asegurar los resultados.

3.6.3. Consideraciones generales

Antes de iniciar el muestreo, debe hacerse el análisis del problema para elaborar el plan de trabajo. Se considera el objetivo de la evaluación y se definen los indicadores y parámetros que se utilizarán; se revisa el sistema de riego por componentes, primero el cabezal de control, luego la red de distribución; después los puntos de control de las secciones de riego y, por último, las longitudes de las tuberías de salidas múltiples, como los distribuidores y las tuberías regantes.

Por ejemplo, si un sistema de riego por aspersión tiene una línea principal con diez hidrantes (válvulas de control o unidades de control autónomas, UCA) espaciados 18 m entre ellos, y una tubería regante de 240 m de longitud, que opera siete horas en cada posición, se debe considerar que tiene diez secciones de riego y que deberían muestrearse tres o cuatro tuberías regantes, seleccionando dos posiciones en las orillas. Esto significa usar las tuberías de las posiciones 1 y 10, y además considerar una o dos en la parte intermedia, correspondientes a las posiciones 5 o 6 en el caso de tres o 4 y 7 en el caso de cuatro.

Cuando se muestrea para determinar la uniformidad hidráulica del sistema de riego por aspersión, es importante estudiar la distribución en campo de las tuberías, la planimetría y la altimetría, y la posición del equipo de bombeo, con la finalidad de interpretar los efectos de las pérdidas de carga y de los desniveles del terreno. Con la interpretación anterior, se seleccionan los aspersores que deben ser aforados para determinar la uniformidad de la descarga de los emisores.

De acuerdo con la experiencia y tomando en cuenta lo anterior, se pueden escoger 3, 5, 9 o 16 aspersores de un sistema de riego, tratando que queden distribuidos en toda la superficie de riego. Si el sistema de riego es grande, con topografía irregular y tiene más de trescientas posiciones de aspersores, puede ser conveniente seleccionar 32 aspersores para realizar los aforos.

En el caso del muestreo para determinar la uniformidad de la lluvia, el tamaño de muestra para coleccionar el agua precipitada en un área del campo, es conveniente que sea mínimo de 36 recipientes distribuidos en hileras igualmente espaciadas, y el espaciamiento entre recipientes dentro de las hileras también deben estar a espaciamientos constantes.



El aspersor es fundamental en la distribución del agua en el campo, y puede ser desde pequeño hasta gigante, de acuerdo con el tipo de cultivo, la topografía y la disponibilidad de agua y energía.

4.1. *Aspersores*

Los aspersores son dispositivos que funcionan como orificios a presión. Lanzan el agua en forma de chorro, el cual al entrar en contacto con el aire se transforma en gotas generando lluvia artificial. Generalmente, el patrón de mojado es circular. Existen aspersores que pueden mojar sectores de círculo mediante un mecanismo de regulación. Se presenta un aspersor de jardín en la parte izquierda de la figura 4.1.

Los aspersores se pueden clasificar por su tamaño en pequeños, estándar y cañones.

4.1.1. Aspersores pequeños

A continuación, se presenta un aspersor versátil que puede intercambiar boquillas para manejar rangos de gastos, de diámetros de mojado y de presiones de operación, y se caracterizan por producir gastos del orden de 0.090 a 0.50 l/s, con diámetros de mojado de 7 a 14 m y presiones de trabajo del orden de 1.5 a 4.0 kilogramos por centímetro cuadrado.

El aspersor que se presenta en la parte derecha de la figura 4.1 es un emisor pequeño, de impacto, de ángulo regulable, de gastos, presiones y diámetros de mojado pequeños. Puede regar círculo completo y sectores de círculo, puede funcionar a baja presión y tiene siete boquillas, cinco de ángulo normal y dos de ángulo bajo.



Figura 4.1. Aspersores pequeños

Estos aspersores se pueden utilizar en sistema fijos para viveros, invernaderos y jardines; también, para dar riegos de germinación en cultivos de hortalizas.

4.1.2. Aspersores estándar

Se presenta a continuación el aspersor estándar como un dispositivo versátil, que puede intercambiar boquillas para manejar rangos de gastos, de diámetros de mojado y de presiones de operación, y se caracteriza por producir gastos del orden de 0.40 a 1.10 l/s, con radios de mojado de 12 a 19 m y presiones de trabajo del orden de 1.0 a 4.0 kg/cm². En la figura 4.2 se presenta un aspersor estándar.

Los aspersores estándar se usan generalmente en la agricultura y en jardines; riegan cultivos de cobertura total, como pastos, cereales y alfalfa; también se utilizan en frutales como nogal y plátano.



Figura 4.2. Aspersor de impacto con dos boquillas.

A continuación, se presentan las curvas carga-gasto y presión-radio de mojado de un aspersor estándar (figuras 4.3 y 4.4).

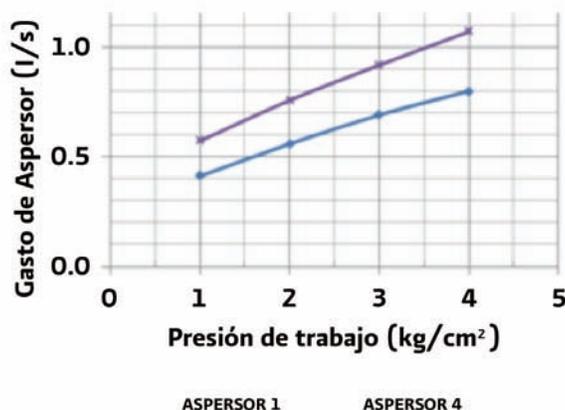


Figura 4.3. Curvas presión-gasto en el rango recomendado de operación, para un aspersor estándar utilizando diferentes boquillas.

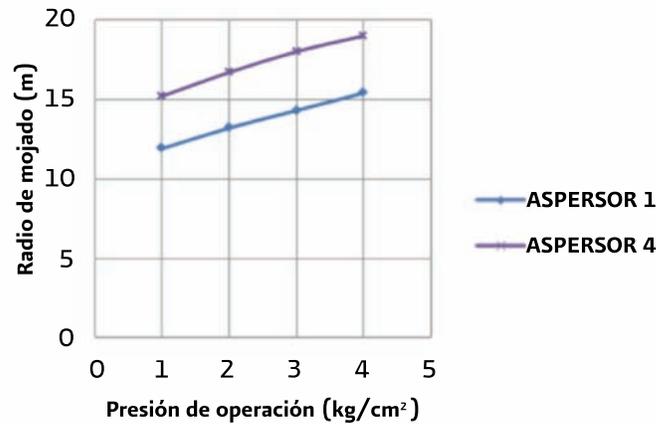


Figura 4.4. Curvas presión-radio en el rango recomendado de operación, para un aspersor estándar utilizando diferentes boquillas.

Los aspersores estándar se pueden agrupar por el tipo de mecanismo que genera el movimiento de rotación para asperjar el agua como lluvia artificial. Hay aspersores de impacto y de rehilete.

Los aspersores de impacto funcionan girando intermitentemente mediante un mecanismo formado por un martillo y un resorte. El chorro choca con un deflector que impulsa al martillo y lo hace girar contra la resistencia del resorte; luego el martillo, por acción del resorte, golpea el cuerpo del aspersor haciéndolo girar y lanzar el chorro en otra dirección.

Los aspersores de rehilete giran por el impulso hidráulico que genera el cambio de dirección del agua en un conducto curvo de los chiflones del aspersor.

4.1.3. Aspersores gigantes

A continuación se presenta un aspersor versátil que puede intercambiar boquillas para manejar rangos de gastos, de diámetros de mojado y de presiones de operación, y se caracterizan por producir gastos del orden de 4.0 a 12.0 l/s, con radios de mojado de 30 a 55 m y presiones de trabajo del orden de 3.0 a 6.0 kg/cm². Estos valores pueden ser mayores, de acuerdo con materiales disponibles en el mercado; sin embargo, en esta época de ahorro de energía es necesario usar aspersores con presiones de operación mínimas.

Los aspersores gigantes (figura 4.5) se usan generalmente en la agricultura; riegan cultivos de cobertura total como pastos, cereales, alfalfa y caña.



Figura 4.5. Aspersor gigante o cañón.

A continuación, se presentan las curvas presión-gasto y presión-radio de mojado de un aspersor gigante con dos boquillas (figuras 4.6 y 4.7).

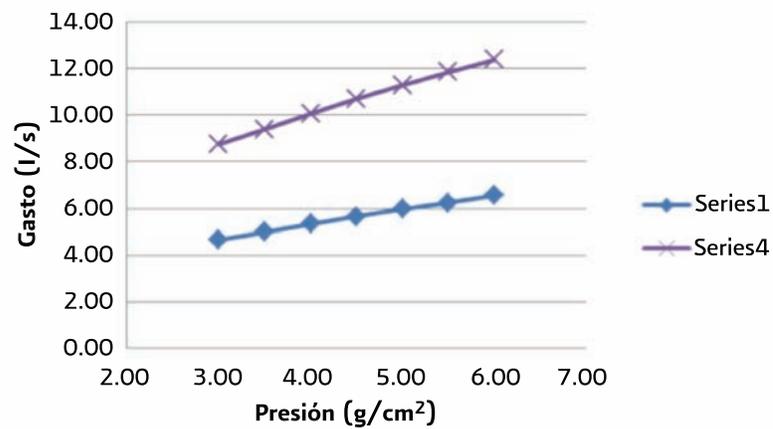


Figura 4.6. Curvas características de aspersores gigantes.

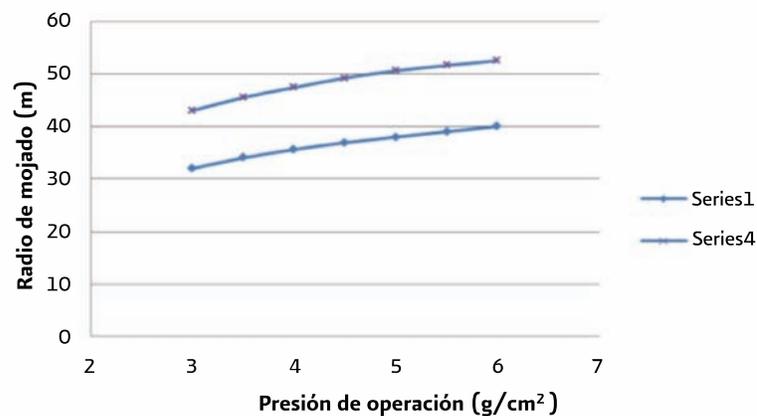


Figura 4.7. Curvas presión-radio de un aspersor gigante en el rango de operación normal.

4.2. Tuberías

En los sistemas de riego por aspersión se usan redes de tuberías para la conducción, distribución y aplicación del agua. Generalmente, las tuberías de conducción y distribución se analizan hidráulicamente como tuberías simples y las tuberías de aplicación del agua o regantes se analizan como tuberías con salidas múltiples.

4.2.1. Tuberías regantes

Las tuberías regantes son aquellas que tienen integrados los emisores o aspersores para riego y suministran el agua a los cultivos. Se clasifican hidráulicamente como tuberías con salidas múltiples (figura 4.8).

En la práctica se considera que la diferencia de gastos hidráulicos, entre el aspersor de gasto mínimo y el de gasto máximo, no debe ser mayor que el 10% del gasto del emisor con descarga mínima. Esto equivale a que la diferencia de presiones de operación de los aspersores en condiciones de mayor y menor carga de trabajo no debe ser mayor de 21% de la presión menor. En terrenos planos y a nivel, corresponden al primero y al último aspersor de la tubería regante, puesto que la diferencia de presiones se debe a las pérdidas de carga hidráulica de la tubería.

Las tuberías en sistemas móviles de riego por aspersión, generalmente son de aluminio y funcionan con flujo turbulento a alta presión. Los acoplamientos entre las tuberías y sus conexiones con los elevadores de los aspersores generan pérdidas de carga localizadas. Las tuberías de sistemas de riego fijos pueden ser de otros materiales como PVC o polietileno de alta densidad.

Las tuberías portátiles generalmente son de material ligero, como el aluminio o el PVC. Las tuberías son de acoplamiento rápido para conectarse en las válvulas o hidrantes de una tubería de alimentación, o bien, a la tubería principal.



Figura 4.8. Tubería regante en aspersión.

4.2.2. Tuberías de conducción y distribución

La red de conducción y de distribución constituye el conjunto de tuberías que llevan el agua desde la fuente de abastecimiento o unidad de bombeo, hasta la entrada de los laterales. La red está compuesta por tuberías generalmente de PVC o aluminio con sus diferentes accesorios como conectores, válvulas de admisión y expulsión de aire en algunos de sus tramos.

En los sistemas de riego por aspersión, la red de distribución, al igual que las tuberías regantes puede ser móvil, fija o mixta. Se dice que es una red móvil cuando todas las tuberías de conducción y distribución se van trasladando junto con las tendidas de riego. Esto es común cuando la fuente de abastecimiento es un canal y, por lo tanto, se mueve la tubería de conducción y la planta de bombeo.

Por otra parte, se dice que una red es fija cuando las tuberías están instaladas para cubrir la totalidad del terreno por regar. Esta clasificación se subdivide en fija permanente cuando las tuberías están enterradas, en donde sólo salen del suelo los tubos porta-aspersores; por otro lado, es fija temporal, cuando la red se instala temporalmente al inicio del ciclo agrícola y se levanta después de la cosecha. Se dice que son redes mixtas cuando alguna parte de la red es fija y otra móvil.

En el caso de los sistemas de movimiento continuo como pivote, cañón o avance frontal, la tubería de conducción generalmente es fija y termina hasta el lugar donde se encuentra el pivote, o bien, la tubería de alimentación se instala dónde están los hidrantes para conectar la motobomba o manguera en el caso del cañón viajero o avance frontal. En algunos casos, puede haber un canal de alimentación donde la motobomba se va desplazando al mismo tiempo que toma el agua para el sistema.

4.3. Sección de riego

Las secciones de riego tienen una unidad de control que puede tener una válvula reguladora de presión o gasto, una válvula de apertura y cierre, un manómetro con válvula para purga y accesorios de instalación como niples, codos y coples. La unidad de control más simple en sistemas de riego por aspersión es un hidrante con su manómetro, que funciona para abrir o cerrar el flujo del agua, para regular el gasto o la presión y medir la presión de operación de la tubería regante.

Un grupo de tuberías regantes abastecidas por una tubería distribuidora, que trabajan simultáneamente con una unidad de control o una tubería regante controlada por un hidrante, constituyen una sección de riego.

En el caso de pivotes centrales y tuberías regantes móviles de avance frontal, la tubería regante y el sistema de riego son lo mismo.

Las piezas especiales que más comúnmente se utilizan son los porta-aspersores o tubos elevadores. En general, constan del tubo donde se instala el aspersor, un acoplamiento rápido

para unir la tubería con el tubo y un estabilizador para mantener el tubo con el aspersor en forma vertical. El tubo porta-aspersor normalmente es de material de aluminio o PVC y su altura depende del cultivo; oscila entre 0.5 y 2 m. Su diámetro es de 19 a 25 mm ($\frac{3}{4}$ a 1 pulgada).

4.4. Equipos y accesorios hidráulicos

En las redes de conducción y de distribución se instalan piezas especiales que sirven para seguridad, control y operación del sistema de riego. Las principales piezas o accesorios son: válvulas de retención, válvulas de alivio de presión, válvulas de control, medidores de gasto y de presión (manómetros) y, por último, válvulas de admisión y expulsión de aire. Se describen a continuación los principales accesorios hidráulicos.

4.4.1. Válvulas

A continuación se presentan varios tipos de válvulas que se utilizan frecuentemente en sistemas de riego presurizado, como son válvulas de retención, de alivio de presión, de control y de admisión y expulsión de aire.

4.4.1.1. VÁLVULA DE RETENCIÓN

Las válvulas de retención son dispositivos que permiten evitar riesgos o daños en el sistema de bombeo. Las válvulas también llamadas *check* evitan que el agua se regrese hacia la bomba. Al apagar un equipo de bombeo que tiene la tubería contra pendiente, tiende a regresar el flujo y, cuando se cierra la válvula de retención, se genera un golpe de ariete, o sea, una serie de ondas de sobrepresión que pueden afectar a la tubería si no hay válvula de alivio de presión que desfogue agua y rompa la onda de presión. Por otra parte, si la tubería después de la bomba está de bajada, una válvula de admisión y expulsión de aire instalada después de la válvula *check* permite la entrada de aire cuando se apaga la bomba y el flujo continúa hacia aguas abajo, sin generar falla de la tubería por succión.

4.4.1.2. VÁLVULA DE ALIVIO DE PRESIÓN

Las válvulas de alivio de presión son indispensables en los sistemas de riego a la salida de la bomba, ya que permiten disipar el exceso de presión debido al golpe de ariete que se genera al cerrar la válvula de retención ocasionado, entre otras causas, por el apagado repentino del equipo de bombeo o el cierre de válvulas durante la operación normal del equipo de bombeo.

Las válvulas de alivio permiten la fuga de agua o aire cuando aumenta la presión sobre un límite preestablecido en la tubería. Esto sucede porque se vence un resorte calibrado a la presión de abertura de la válvula (figura 4.9).



Figura 4.9. Integración de válvula de alivio de presión, con válvula de admisión y expulsión de aire, en las funciones de seguridad.

4.4.1.3. VÁLVULAS DE CONTROL

Válvulas de control. Se recomienda instalar este tipo de válvulas en sitios estratégicos dentro de la red de conducción principal para aislar tramos de tubería o secciones de riego que no se requiere operar permanentemente, o se encuentren en reparación durante la operación normal de la temporada de riegos.

Las válvulas de control sirven para cerrar o abrir conductos, de manera parcial o total. Con las válvulas de control puede regularse el gasto o la presión en una tubería. Cerrándolas se reduce el gasto y abriéndolas se incrementa la descarga hidráulica.

4.4.1.4. VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y EXPULSIÓN DE AIRE

El sistema de riego debe contener válvulas de admisión y expulsión de aire ubicadas en el cabezal de control y a lo largo de la red de conducción y de distribución. El sistema de riego las requiere para la admisión de aire cuando la tubería se vacía y para la evacuación del aire durante su llenado (figura 4.10). Estas válvulas se requieren, generalmente, cuando la tubería de conducción excede los 500 m de longitud en terrenos planos a nivel o pasa por puntos altos de la parcela, donde puede quedar aire atrapado e impedir el flujo normal del agua en la tubería.

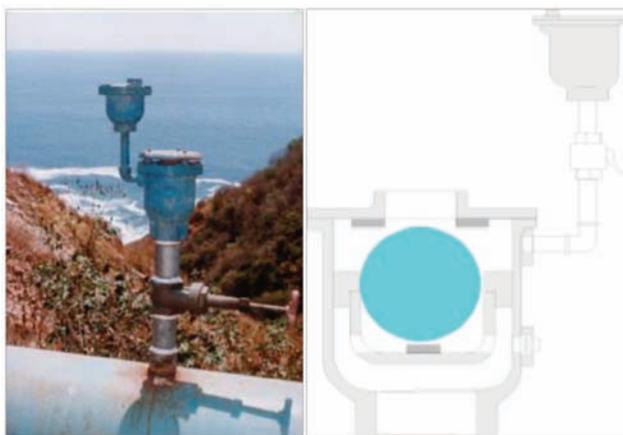


Figura 4.10. Válvula de admisión y expulsión de aire en conducciones presurizadas.

4.4.2. Medidores de gasto hidráulico

Los medidores de gasto son dispositivos que relacionan la velocidad del agua y su área de paso. Se calibran de manera tal que indican el gasto hidráulico que pasa por ella. Pueden basarse en la velocidad, en la carga de velocidad o en la velocidad de partículas que fluyen con el agua. Pueden ser de placa de orificio, de tubo Venturi, de tubo Pitot, de propela o turbina, electromagnético y ultrasónico, este último de efecto Doppler o de tiempo en tránsito. Para realizar evaluaciones de sistemas de riego es conveniente tener medidores portátiles, de flujo de alta precisión y amplio rango.

Generalmente, cuentan con indicador numérico o analógico del gasto hidráulico que pasa por la tubería y pueden tener sistema volumétrico de medición. Estos medidores indican directamente el estado del funcionamiento del sistema de riego por medio del gasto de operación del sistema de riego. La exactitud se observa en la figura 4.1.

Cuadro 4.1. Características de medidores de flujo.

COMPARATIVA DE LOS DISTINTOS SENSORES DE FLUJO						
Sensor de flujo	Líquidos recomendados	Pérdida de carga	Exactitud típica en %	Medidas y diámetros	Efecto de viscosidad	Costo relativo
Placa de orificio	Sucios y limpios, algunos líquidos viscosos	Medio	De 2 a 4% escala total	10 a 30%	Alto	Bajo
Tubo Venturi	Viscosos, sucios y limpios	Bajo	1%	5 a 20%	Alto	Medio
Tubo Pilot	Limpios	Muy bajo	3 a 5%	20 a 30%	Bajo	Bajo
Propela	Limpios y viscosos	Alto	.25%	5 a 10%	Alto	Alto
Electromagnético	Sucios y limpios, líquidos viscosos y conductores	No	.05%	5	No	Alto
Ultrasonido (Doppler)	Sucios y limpios, líquidos viscosos y conductores	No	5%	5 a 30%	No	Alto
Tiempo en tránsito	Limpios y líquidos viscosos	No	1 a 5%	5 a 30%	No	Alto

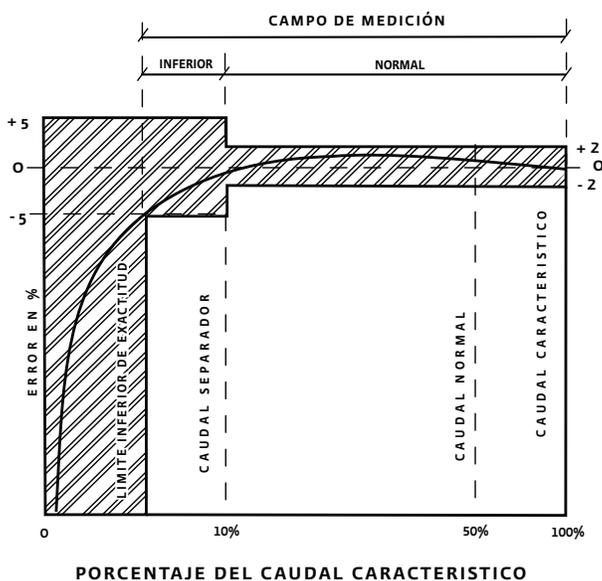


Figura 4.11. Exactitud en el campo de medición.

4.4.2.1. MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Estos aparatos reducen el área de paso y crean una pérdida de carga, con reducción en la carga piezométrica aguas abajo del dispositivo. Dentro de este grupo de medidores se encuentran los de placa orificio y los Venturi.

4.4.2.2. MEDIDORES DE GASTO DE PLACA DE ORIFICIO

El medidor consiste en una placa con un orificio de diámetro menor que el de la tubería. Se instala perpendicularmente al flujo del agua y está calibrada de acuerdo con las pérdidas de carga que se generan al pasar el agua por el orificio. El indicador de pérdida de carga puede ser piezométrico diferencial; esto es, que mide la presión antes y después de la placa con piezómetros o manómetros, y se restan las presiones para determinar las pérdidas de carga que corresponden al gasto que está pasando, o bien, con medidor digital de sensores de presión electrónicos. En el último caso, se puede proporcionar el gasto instantáneo y el volumen que pasa en cierto intervalo de tiempo. Puede generar pérdidas de carga del orden de 1 a 3 m y se usa en tuberías principales.

4.4.2.3. MEDIDORES DE GASTO DE PROPELA Y TURBINA

Los medidores de propela son dispositivos que tienen una hélice (figura 4.12) o una turbina, que gira al pasar el agua por el medidor. El número de vueltas de la hélice o turbina está relacionado con el volumen que pasa por la tubería. Puede tener indicador de gasto instantáneo e indicador volumétrico. Tienen pérdidas de carga del orden de 0.7 m para gastos máximos de operación y se usa en tuberías principales. Requiere de mantenimiento y recalibración permanentemente. En campo, por lo general, no se les da servicio de mantenimiento y luego se dice “que fallan”.



Figura 4.12. Medidor de propela para tuberías.

4.4.3. Medidor de presión

Los manómetros son dispositivos que sirven para medir la presión en diferentes puntos del sistema de riego. Tienen sensores que indican las presiones de operación y generalmente son mecánicos con carátula (figura 4.13). No generan pérdidas de carga en las tuberías. Los

sistemas de riego por aspersión se pueden supervisar en el cabezal de control, leyendo la presión de operación del sistema en el momento de la inspección, debido a que para cada gasto del sistema corresponde una presión de operación.

Es común que no se operen correctamente las tuberías portátiles de riego por aspersión porque los regadores no están capacitados para medir la presión de operación en la entrada de la regante, y tampoco usan manómetros en los codos de arranque o manómetros con tubos Pitot para medir la presión de operación de los aspersores y verificar la presión de operación en la regante. En el campo cada tubería regante debe tener una presión de operación específica para que los aspersores funcionen con el gasto necesario y se controle el volumen o la lámina con tiempo de operación.



Figura 4.13. Manómetros con glicerina (reductora de vibraciones).

4.5. Sistema de bombeo

En los sistemas de riego por aspersión el cabezal de control tiene como funciones principales: a) presurizar el sistema b) controlar el gasto hidráulico del sistema de riego, c) proteger el equipo de bombeo, d) medir el gasto y la presión a la salida del equipo de bombeo y e) inyectar agroquímicos al sistema de riego. Para operar se requiere un aprovechamiento hidráulico como pozo de un acuífero, una obra de toma o un cárcamo de una fuente de suministro de agua superficial, de sistema de bombeo, de la subestación eléctrica, e incluye equipo de inyección de agroquímicos y accesorios.

4.5.1. Unidad de bombeo

El sistema de bombeo está integrado por el equipo de bombeo, el sistema eléctrico, la obra civil complementaria, el equipo de fertirriego y los accesorios.

De acuerdo con la fuente de abastecimiento es el tipo de aprovechamiento y, por lo tanto, los componentes del sistema de bombeo. En los aprovechamientos de acuíferos subterráneos se usan equipos de bombeo de pozo profundo, y en los aprovechamientos superficiales generalmente se utilizan equipos de bombeo de eje horizontal (figura 4.14.).

En el caso de los sistemas de bombeo de pozo profundo, se requiere de la perforación del pozo y de la construcción de un brocal que proteja el pozo al instalar y operar el equipo de bombeo, de la bomba misma y de la subestación eléctrica. Generalmente, los equipos de bombeo son de turbina vertical o sumergible. En este último caso, donde el ademe permita

el paso de arena, los equipos de bombeo deben ser resistentes a la abrasión y es necesario poner un hidrociclón para decantar la arena y prevenir problemas de desgaste de tuberías o taponamientos.

En el caso de los aprovechamientos superficiales, normalmente se requiere de un cárcamo de bombeo como obra de aprovechamiento. El cárcamo es una obra compuesta principalmente de un acceso para el agua y de una fosa para extraer el agua con el equipo de bombeo. La fosa es depósito excavado o acondicionado en la fuente de abastecimiento.



Figura 4.14. Motobomba centrífuga diesel remolcable.

El equipo de bombeo consiste de una bomba hidráulica y su motor, que proporciona la energía necesaria para mover el agua desde el cárcamo hasta su aplicación en los emisores de la parcela. El motor puede ser eléctrico o de combustión interna. En las plantas de bombeo, para los sistemas de riego, se emplean los siguientes tipos de bombas: de eje horizontal, llamadas simplemente centrífugas; las de eje vertical, conocidas como bomba turbina vertical, y las sumergibles (figura 4.15).



Figura 4.15. Cárcamo rectangular y planta de bombeo con bombas de turbina vertical.

4.5.2. Subestación eléctrica

El sistema eléctrico completo consta de una subestación eléctrica que incluye postes, acometidas, apartarrayos, cuchillas, transformador, tuberías, arrancadores, y su estructura de

montaje, cables, interruptor y un medidor de voltaje (figura 4.16). En el caso de motores de combustión interna ninguno de los materiales anteriores es necesario, pero sí es indispensable tener un tanque de almacenamiento temporal de combustible.



Figura 4.16. Subestación eléctrica.

La obra civil complementaria consta de un sistema de prefiltrado o un estanque decantador, un cárcamo de bombeo, una losa de apoyo, una caseta y un nicho de motores. En algunos casos, es conveniente acondicionar un patio de maniobras y una malla cerca para proteger la unidad de bombeo y la unidad de control general. Se puede ver la planta tipo en la figura 4.15.

4.5.3. Obra de toma

La razón de separar la obra de toma del resto de los componentes de la unidad de bombeo es que, en algunos casos donde hay carga hidráulica disponible, no se requiere de un equipo de bombeo, pero sí de una obra de toma (figura 4.17).

En general, se puede decir que la obra permite tomar el agua de la fuente de abastecimiento para conducirla hasta el cárcamo de bombeo. Las partes de la obra de toma son: el acceso, la estructura de entrada, las rejillas de prefiltrado o malla de filtrado, el mecanismo de control y el conducto.



Figura 4.17. Obra de toma con rejilla y trampa de azolves.



Los sistemas de riego se adaptan a las condiciones de gasto hidráulico disponible, topografía, del suelo, del tipo de cultivo, de la disponibilidad de mano de obra, y del productor.

Para evaluar sistemas de riego por aspersión es necesario conocerlos en sus componentes y su funcionamiento, porque el método de evaluación varía de acuerdo con sus características. Hay muchos tipos de sistemas de riego por aspersión y pueden ser agrupados en tres clases según su movimiento dentro del terreno: a) sistemas de aspersión fijos, b) sistemas de aspersión semifijos y c) sistemas de aspersión móviles. En este libro se presentan algunos de los sistemas de riego por aspersión típicos.

5.1. *Sistemas fijos*

Los sistemas de riego fijos tienen las tuberías de conducción, distribución y regantes enterradas. Sólo las unidades de control autónomas, los elevadores y los aspersores salen del suelo y tienen la fuente de suministro de agua y la planta de bombeo fijas. Deben tener el número de tuberías regantes necesario para dominar todo el campo sin mover las tuberías.

Los sistemas de riego por aspersión fijos son frecuentemente usados para regar jardines y campos deportivos. Su costo inicial es muy alto, pero el costo de la mano de obra y de operación es muy bajo. Generalmente se utilizan para regar frutales como nogal y plátano; también se usan en viveros. Los sistemas fijos tienen aspersores pequeños de ángulo bajo (subfoliar), superando en gasto y alcance a los microaspersores. Se usan para pastizales, que rigen por debajo del follaje caña y palma con aspersores gigantes. En la figura 5.1 se observan aspersores portátiles conectados a un elevador fijo o permanente.



Figura 5.1. Sistema de riego por aspersión permanente.

5.2. Sistemas semifijos

Los sistemas semifijos son similares a los sistemas completamente portátiles, con excepción de que se usan en un sitio durante todo el ciclo de cultivo. Las tuberías de conducción y distribución, en algunos casos, están enterradas. Las tuberías laterales o regantes se alimentan de hidrantes y se pueden mover manual o mecánicamente con un motor. Se usan para regar hortalizas o dar riegos de germinación, como se puede ver en la figura 5.2.

Estos sistemas de riego en los cultivos anuales se instalan después de la siembra, con tuberías regantes espaciadas igual que en los sistemas portátiles, sólo que no se trasladan a otras posiciones y permanecen en el sitio hasta el momento de ser removidos para las operaciones de la cosecha. Retornan hasta la siguiente siembra o son transferidos a otra parcela.



Figura 5.2. Sistemas de aspersión semifija para siembra de hortalizas.

5.3. Sistemas móviles

Los sistemas de riego por aspersión móviles pueden agruparse en sistemas portátiles de movimiento intermitente y de movimiento continuo. Los portátiles son tuberías laterales que riegan en una posición el tiempo necesario para aplicar la lámina de riego proyectada, y después se mueven cambiando de posición. Los segundos riegan durante su movimiento de traslado.

5.3.1. Sistemas portátiles de movimiento intermitente

Estos sistemas de riego son completamente portátiles y se componen de motobomba (figura 5.3.), tuberías de conducción, distribución, regantes con sus aspersores y accesorios. Todas las tuberías del sistema de riego generalmente son de aluminio y se pueden mover de una sección de riego a otra; se dividen en movimiento manual y movimiento mecánico.



Figura 5.3. Equipos de bombeo de sistemas de riego por aspersión portátil preparado como remolque para transportarse con tractor.

5.3.1.1. SISTEMAS PORTÁTILES DE MOVIMIENTO MANUAL

Los sistemas completamente portátiles de parcelas pequeñas tienen equipo de bombeo, tuberías de conducción, distribución y regantes de diámetros (de 50 a 75 mm) y tramos de tubo con longitudes aproximadas de 3, 6 y 9 m que permiten su transporte manual. Por lo común, la planta de bombeo está montada en un remolque y se traslada con tractor. En la figura 5.4 se observa un sistema de riego operando durante una práctica de evaluación de riego por aspersión. El sistema de riego es portátil manual con varias tuberías regantes operando simultáneamente.



Figura 5.4. Sistema de riego por aspersión portátil manual de varias tuberías regantes operando simultáneamente.

En los sistemas de riego portátiles movidos manualmente el espaciamiento entre aspersores varía entre 6 m y 12 m; el espaciamiento entre posiciones de tuberías regantes varía entre 12 y 18 metros.

En la figura 5.5 se observa a dos trabajadores preparando la evaluación de un sistema de riego. También se puede ver una parte del sistema portátil manual, con dos regantes y un distribuidor. En este caso, se pretende captar la lluvia de dos regantes operando al mismo tiempo para verificar el traslape del chorro de agua y obtener la uniformidad de distribución de la lluvia.



Figura 5.5. Sistema de riego por aspersión portátil manual con distribuidor y regantes.

En la figura 5.6, se puede ver operando una tubería regante de un sistema de riego por aspersión portátil manual con elevadores y aspersores de ángulo alto.



Figura 5.6. Tubería regante de un sistema de riego por aspersión portátil manual con elevadores.

En la figura 5.7 se muestra un aspersor gigante o cañón portátil, operando sobre su elevador.



Figura 5.7. Aspersor gigante de un sistema de riego por aspersión portátil manual con su elevador.

5.3.1.2. SISTEMAS PORTÁTILES DE MOVIMIENTO MECÁNICO

Son sistemas de riego que básicamente tienen líneas regantes o laterales apoyadas en una serie de ruedas. La tubería regante permanece en una posición durante la aplicación del agua en el riego y deja de funcionar para trasladarse a la siguiente posición mediante el rodamiento de la tubería. Los aspersores están conectados a la tubería de 100 mm de diámetro montada en las ruedas, con un dispositivo sin fin, de manera que al girar la tubería, la posición del aspersor queda normal con posibilidad de regar correctamente debido a un contrapeso. El espaciamiento entre aspersores por lo general es de 12 m, y el espaciamiento entre posiciones de regante es de 18 m. Sin embargo, los hidrantes normalmente se instalan cada 54 m utilizando una manguera que les permite regar tres posiciones del equipo de riego.

Estos sistemas de riego se utilizan en terrenos rectangulares porque la tubería regante se mueve perpendicularmente a la orilla del terreno. En la figura 5.8 se puede ver la caja amarilla donde está el motor y también el sistema de ruedas de soporte del motor. Éste hace girar la tubería regante sobre su propio eje, que genera la tracción para realizar el avance de la tubería regante, rodando sobre su propio eje.



Figura 5.8. Motor y sistema de tracción para generar el avance de la tubería regante, rodando sobre su propio eje.

En la figura 5.9 se observa un aspersor con contrapeso conectado a la tubería rodante del sistema de riego. En la figura 5.10 se puede ver un aspersor con contrapeso conectado al final de la tubería rodante. Estos contrapesos sirven para que el aspersor quede en posición de operar correctamente, sin importar la posición de giro de la tubería regante. Debe evitarse que el chorro pegue en la tubería para regar bien.



Figura 5.9. Aspersor con contrapeso conectado a la tubería rodante en posición incorrecta de riego.



Figura 5.10. Aspersor con contrapeso conectado al final de la tubería rodante en posición correcta de riego.

5.3.2. Sistemas de movimiento continuo

Los sistemas de riego por aspersión de movimiento continuo aplican el agua al terreno y a los cultivos durante su movimiento y pueden ser cañones viajeros, regantes con pivote central y regante de avance frontal.

5.3.2.1. CAÑÓN VIAJERO

Los sistemas de riego de cañón viajero están compuestos por la unidad de bombeo, fuente de energía, tubería principal, hidrantes, manguera flexible, unidad móvil o viajera y el aspersor gigante o cañón.

El cañón viajero es un aspersor gigante (figura 5.11) con una unidad de enrollamiento de manguera y transporte con ruedas (figura 5.12). La unidad se coloca en una posición al final de la trayectoria y se une con una manguera flexible, la cual está conectada a un hidrante para el suministro del agua. El cañón viajero generalmente es jalado por un cable o por la misma manguera. La longitud de la manguera es del orden de 200 m, y si se coloca regando hacia dos lados, cubre una longitud de 400 m, aproximadamente. Riega una franja de terreno cuyo ancho depende del alcance del cañón, y puede variar el espaciamiento entre posiciones de la manguera entre 40 y 110 metros.



Figura 5.11. Aspersor de cañón viajero.



Figura 5.12. Enrollador de cañón viajero.

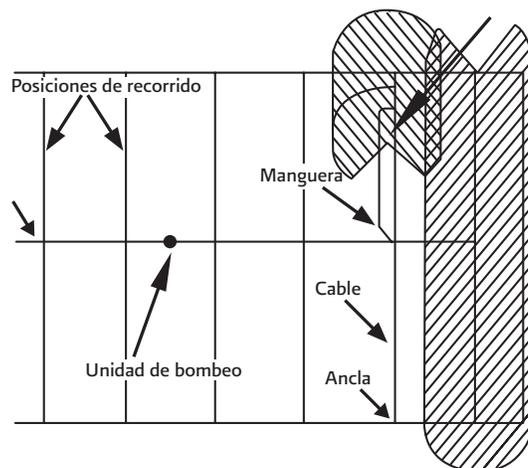


Figura 5.13. Trazo de riego de un cañón viajero.

5.3.2.2. REGANTE DE PIVOTE CENTRAL

Esta máquina de riego es una tubería regante con aspersores o microaspersores, que se mueve en círculo alrededor de un punto fijo o pivote, donde tiene la entrada del agua. La tubería es soportada por torres metálicas, movidas con dos ruedas instaladas en su base y autopropulsadas mediante un motor eléctrico (o hidráulico). La línea regante se alinea por medio de un sistema de control que regula el avance de cada torre. Si la alineación falla, debido al atascamiento u obstrucción de una rueda, el sistema suspende su funcionamiento.

La tubería regante del pivote central generalmente tiene aspersores con gasto y diámetro de mojado diferentes a lo largo de la tubería, con la finalidad de compensar la velocidad tangencial de cada punto de la tubería regante. Entre mayor es el radio que corresponde a la posición de un aspersor, mayor es el área que riega; por lo tanto, se requiere mayor gasto para igualar las láminas de riego.

En la figura 5.14 se observa una estructura de pivote con el inicio de la tubería regante y la caja de controles de color azul. Ahí se programa la velocidad de rotación para controlar la lámina de riego. A mayor velocidad de la tubería regante, menor lámina de riego aplicada, y a menor velocidad de la tubería, mayor tiempo de oportunidad de captación de agua en el suelo. También se observa una tubería regante de otro pivote con torres de apoyo con ruedas.



Figura 5.14. Sistemas de riego con pivote central para permitir el giro de la tubería regante.

5.3.2.3. TUBERÍA REGANTE DE MOVIMIENTO FRONTAL O AVANCE FRONTAL

En este sistema de riego, la tubería regante o el lateral se mueven continua, lineal y perpendicularmente a lo largo de una tubería de distribución con hidrantes, complementado con una tubería flexible, o bien, de un canal recto de suministro de agua en una orilla de la parcela y una motobomba integrada a la primera torre para suministrar el agua y presurizar el sistema. Sirve para regar terrenos rectangulares.

La tubería es soportada por torres metálicas y es movida por ruedas autopropulsadas mediante un motor eléctrico (o hidráulico). La línea regante se alinea por medio de un sistema de control que regula la velocidad de cada torre.

Si la alineación falla debido al atascamiento u obstrucción de una rueda, el sistema suspende su funcionamiento.

La tubería regante de avance frontal tiene aspersores con gasto y diámetro de mojado constante a lo largo de la tubería, con la finalidad de aplicar lámina de riego uniforme.

En las figuras de la 5.15 a la 5.18 se observa un sistema de riego de tubería regante de avance frontal, incluyendo la fuente de abastecimiento, un hidrante, la tubería de suministro, el aspersor del sistema y la estructura de soporte de la tubería con una torre.

Cuando la fuente de abastecimiento de agua es un acuífero con equipo de bombeo de gasto relativamente pequeño, se pueden usar tanques de almacenamiento temporal del agua, de manera que el equipo de bombeo trabaja todo el día y se extrae el agua del estanque, sólo en las horas de operación, de acuerdo con la capacidad del equipo de riego.

En la figura 5.16, del lado izquierdo, se ve una persona operando un hidrante para suministrar agua a la tubería de avance frontal y la calle donde avanza el sistema de riego. Además, en la fotografía del lado derecho se observa la torre inicial de la tubería regante.

En la figura 5.17, del lado izquierdo, se observa un microaspersor operando y, en la del lado derecho, se puede ver la tubería regante de avance frontal con su estructura y una torre.



Figura 5.15. Tanque de almacenamiento de la descarga de un equipo de bombeo de pozo profundo, para el riego de una tubería regante de avance frontal.



Figura 5.16. Hidrante para el riego de una tubería regante de avance frontal.



Figura 5.17. Microaspersor y tubería regante de avance frontal.



Los resultados de las evaluaciones permiten realizar acciones de mejora en los sistemas de riego, tanto en la infraestructura, como en la operación.

Para conocer el grado de aprovechamiento del agua y el desempeño de los sistemas de riego por aspersión, se requiere realizar evaluaciones agronómicas, hidráulicas y económicas. Con los resultados de los indicadores de desempeño deben darse las recomendaciones para el mejoramiento del sistema o de la operación y, en el caso que los indicadores sean excelentes, felicitar al productor por tener un sistema bien diseñado y bien operado.

A continuación, se tratan los tres tipos de evaluación.

6.1. Evaluación agronómica

Los principales indicadores agronómicos del grado de aprovechamiento de un sistema de riego son: la productividad del agua en la cosecha y la eficiencia global del sistema de riego.

Las recomendaciones que deben generarse del análisis agronómico del sistema de riego deben ser acerca de cuándo, cuánto y cómo regar para mejorar la productividad de los cultivos y la calidad de los productos, y usar racionalmente el agua de riego sin erosionar, sin desperdicios y sin contaminar el entorno.

6.1.1. Productividad del agua

El objetivo principal del riego por aspersión es contribuir con el desarrollo y la producción de los cultivos, de manera que entre mejor se utilice el agua, el beneficio será mayor, incluyendo la productividad de los cultivos, el aprovechamiento de los fertilizantes, el ahorro de energía y reducción de contaminación de drenes o del subsuelo.

La productividad del agua es el cociente de dividir la cantidad total del producto de la cosecha obtenido entre el volumen total de agua utilizado en la producción. También se usa la productividad en términos económicos; una opción es dividir el valor total de la cosecha entre el volumen total de agua utilizado y, otra opción, es usar el valor de la utilidad económica entre el volumen total de agua utilizado. Entre menor es el volumen de agua utilizado para producir una cosecha del mismo nivel de producción, es mayor la productividad del agua.

En la productividad de los cultivos influyen la calidad, cantidad y la oportunidad de aplicación del agua de riego. A continuación, se presentan algunos conceptos que permiten

conocer las ventajas de usar el riego por aspersión debido a sus características de operación, como es aplicar láminas de riego pequeñas, uniformes y frecuentes.

En la producción de hortalizas para cosechar frutos frescos y jugosos, se requiere mantener altos niveles de humedad aprovechable en el suelo durante todo el ciclo de cultivo para que las plantas no se estresen o presenten síntomas de falta de turgencia en sus células y tejidos. Cuando aparecen los síntomas visibles de marchitamiento o flacidez en un cultivo de hortalizas, ya se ha generado un daño irreversible en el cultivo, que representa reducción en la calidad o cantidad del producto, por lo que debe evitarse agotar la humedad fácilmente aprovechable en el suelo.

En el cultivo de la caña, cuando se presenta déficit de agua durante el crecimiento de las plantas, se manifiesta en el tallo con canutos (parte entre dos nudos del tallo de la caña más pequeños) de menor tamaño, por lo que también debe mantenerse durante todo el ciclo con altos niveles de humedad fácilmente aprovechable.

Por otra parte, en cultivos de gramíneas, se sabe que pueden resistir ciertos niveles de estrés durante las primeras etapas de desarrollo del cultivo y, si en las etapas de floración y fructificación tienen niveles altos de humedad fácilmente aprovechable, pueden producir altos rendimientos de grano, con poca paja. Por lo anterior, si sólo interesa la producción del grano, se debe producir con la mínima cantidad de agua para obtener el máximo de producción.

Para regar con alta productividad en un ciclo de cultivo, es necesario regar eficientemente en cada riego y en el momento oportuno, por lo que las láminas de riego deben ser de la magnitud que garantice el requerimiento de riego y humedezca el suelo hasta capacidad de campo en el espesor aprovechable por la raíz del cultivo, así como en el intervalo de tiempo adecuado para que no se castigue al cultivo.

Para conocer la productividad del agua es necesario medir el rendimiento obtenido en el cultivo y el volumen de agua utilizado.

$$PA = \frac{RC}{VA}$$

PA – Productividad del agua (t/Mm³).

RC – Rendimiento del cultivo (t).

VA – Volumen de agua utilizado para producir el cultivo (Mm³)

$$PA = \frac{VC}{VA}$$

PA – Productividad del agua (\$/Mm³).

VC – Valor de la cosecha (\$).

VA – Volumen de agua utilizado para producir el cultivo (Mm³)

$$PA = \frac{U}{VA} = \frac{VC - C}{VA}$$

PA – Productividad del agua (\$/Mm³).

U – Utilidades de la cosecha (\$).

VA – Volumen de agua utilizado para producir el cultivo (Mm³).

VC – Valor de la cosecha (\$).

C – Costo de la cosecha (\$).

6.1.2. Eficiencia global del sistema de riego

La eficiencia global de riego es el cociente de dividir el requerimiento de riego entre el volumen total de agua utilizado para la producción del cultivo.

En el requerimiento de riego se toman en cuenta dos componentes: el primero es el volumen necesario de agua para el cultivo y, el segundo, es el volumen correspondiente a las aportaciones naturales de agua.

El volumen necesario de agua para producir un cultivo y ayudar a la sustentabilidad de la parcela, incluye el volumen de agua transpirado y evaporado de la superficie de las plantas, el volumen utilizado por las mismas en la formación de sus tejidos, el volumen evaporado directamente del suelo y, por último, el volumen necesario para controlar la concentración de las sales en la solución del suelo.

Las aportaciones naturales de volúmenes de agua que generalmente se presentan durante el desarrollo de los cultivos son: el volumen correspondiente a la lluvia aprovechada, el volumen aportado por el manto freático y el volumen aportado por el rocío. Estos volúmenes de agua aportados en forma natural reducen el volumen requerido de suministro artificial de agua o el volumen requerido de riego por el cultivo.

En resumen, el requerimiento de riego: es el volumen necesario para producir un cultivo, más el volumen necesario para control de sales en el suelo, menos las aportaciones naturales que se presentan durante el ciclo de cultivo.

El volumen total de agua utilizada para riego es la suma de volúmenes de requerimiento de riego, de pérdidas por evaporación e infiltración en el vaso de almacenamiento, de pérdidas por filtración y operación en la red de conducción y, por último, las pérdidas durante la aplicación del agua de riego, incluyendo las pérdidas por arrastre, evaporación y percolación. En riego por aspersión no debe haber pérdidas por escurrimiento; si existen, el diseño o la operación, o ambos, no son los correctos.

Entonces, la eficiencia de riego teórica se puede presentar de la siguiente manera:

$$ER = \frac{V_{tr} + V_{tej} + V_{epys} + V_{cs} - V_{lle} - V_{mf} - V_{ro}}{V_{total}} = \frac{V_{rr}}{V_{total}}$$

ER – Eficiencia de riego (decimal).

V_{rr} – Volumen de agua requerido para el riego (Mm^3).

V_{tr} – Volumen de agua necesario para la transpiración del cultivo (Mm^3).

V_{epys} – Volumen de agua necesario para la evaporación de las plantas y del suelo (Mm^3).

V_{tej} – Volumen de agua necesario para la formación de tejidos (Mm^3).

V_{cs} – Volumen de agua necesario para el control de sales (Mm^3).

V_{lle} – Volumen de agua aprovechado de la lluvia o lluvia efectiva (Mm^3).

V_{mf} – Volumen de agua aportado por el manto freático (Mm^3).

V_{ro} – Volumen de agua aportado por el rocío (Mm^3).

V_{total} – Volumen de agua total extraído para riego (Mm^3).

En la práctica, los volúmenes de agua evaporados directamente de las plantas y del suelo se incluyen en el término de evapotranspiración de agua por el cultivo; los términos correspondientes al volumen de agua que se usa para la formación de tejidos y las aportaciones de rocío se desprecian por ser cantidades pequeñas. Si no hay salinidad y mantos freáticos presentes, la fórmula generalmente se reduce a:

$$ER = \frac{V_{et}}{V_{total}} = \frac{V_{rr}}{V_{total}}$$

ER – Eficiencia de riego (decimal).

V_{rr} – Volumen de agua requerido para el riego (Mm^3).

V_{et} – Volumen de agua de transpiración del cultivo y evaporación de las plantas y del suelo (Mm^3).

V_{total} – Volumen total de agua extraído para riego (Mm^3).

6.1.3. Eficiencias parciales

El concepto de eficiencia de riego ha sido usado para expresar el desempeño de un sistema de riego completo o de una parte del sistema. Se han utilizado las eficiencias parciales o componentes siguientes: eficiencia de almacenamiento, eficiencia de conducción y eficiencia de aplicación; estos son factores de la eficiencia global.

En el caso del riego por aspersión, la eficiencia de aplicación debe incluir las pérdidas por arrastre y evaporación; y las pérdidas por falta de uniformidad de lluvia y de uniformidad de descarga de los aspersores.

6.1.3.1. EFICIENCIA DE ALMACENAMIENTO

Hay sistemas de riego que tienen como parte de la obra de aprovechamiento un almacén de agua, que puede ser una presa con vaso de almacenamiento o, también, un estaque construido para almacenamiento y regulación del volumen de agua extraído de un acuífero subterráneo, por medio de un equipo de bombeo de pozo profundo.

La eficiencia de almacenamiento es el cociente de dividir el volumen extraído para riego, entre el volumen que entró al almacenamiento durante el mismo periodo de tiempo. En las presas de almacenamiento debe considerarse el volumen ecológico, el de usos urbanos y otros usos, para repartir las pérdidas por evaporación proporcionales a todos los usos.

$$E_{alm} = \frac{V_{ext}}{V_{talm}}$$

E_{alm} – Eficiencia de almacenamiento (decimal).

V_{ext} – Volumen extraído de la fuente de suministro (Mm^3).

V_{talm} – Volumen almacenado útil para riego (Mm^3).

6.1.3.2. EFICIENCIA DE CONDUCCIÓN

La eficiencia de conducción es el cociente de dividir el volumen de agua entregado para riego en las parcelas, entre el volumen que entró a la red de conducción durante el mismo periodo de tiempo o que se extrajo de la fuente de suministro.

$$EC = \frac{V_{ent}}{V_{ext}} = \frac{G_{ent}}{G_{ext}}$$

EC – Eficiencia de conducción (decimal).

V_{ent} – Volumen entregado en la parcela (Mm^3).

V_{ext} – Volumen extraído de la fuente de suministro (Mm^3).

G_{ent} – Gasto entregado en la parcela (m^3/s).

G_{ext} – Gasto extraído (m^3/s).

6.1.3.3. EFICIENCIA DE APLICACIÓN

La eficiencia de aplicación es el cociente de dividir el volumen de agua requerido de riego por el cultivo, entre el volumen que se entregó en las parcelas durante el mismo periodo de tiempo.

$$E_{apl} = \frac{V_{rr}}{V_{ent}} = \frac{L_{rr}}{L_{ent}}$$

E_{apl} – Eficiencia de aplicación (decimal).

V_{rr} – Volumen requerido de riego (Mm^3).

V_{ent} – Volumen entregado en la parcela (Mm^3).

L_{rr} – Lámina requerida de riego (Mm^3).

L_{ent} – Lámina entregada en la parcela (Mm^3).

Esta fórmula tiene variantes en su aplicación debido a las diferentes interpretaciones del requerimiento de riego.

- a) Considerando el caso de que hay necesidad de aplicar un volumen para control de salinidad, se tiene:

$$E_{apl} = \frac{V_{et} + V_{cs}}{V_{ent}}$$

E_{apl} – Eficiencia de aplicación (decimal).

V_{et} – Volumen necesario para la formación de tejidos (Mm^3), transpiración del cultivo y evaporación del suelo (Mm^3).

V_{cs} – Volumen de control de sales (Mm^3).

V_{ent} – Volumen entregado en la parcela (Mm^3).

- b) Si además de volumen de control de salinidad hay lluvia efectiva no despreciable y aportación de manto freático, entonces la fórmula queda:

$$E_{apl} = \frac{V_{et} + V_{cs} - V_{lle} - V_{mf}}{V_{ent}}$$

E_{apl} – Eficiencia de aplicación (decimal).

V_{et} – Volumen necesario para la formación de tejidos (Mm^3), transpiración del cultivo y evaporación del suelo (Mm^3).

V_{cs} – Volumen de control de sales (Mm^3).

V_{lle} – Volumen de lluvia efectiva (Mm^3).

V_{mf} – Volumen aportado por el manto freático (Mm^3).

V_{ent} – Volumen entregado en la parcela (Mm^3).

- c) Se pueden presentar variantes del requerimiento de riego y debe ajustarse la fórmula a los componentes necesarios de cada caso.

6.1.3.4. TIPOS DE EXPRESIONES DE LAS EFICIENCIAS USADAS EN RIEGO

La eficiencia de riego, en función de las eficiencias parciales, se presenta a continuación:

$$ER = E_{alm} * EC * E_{apl}$$

ER – Eficiencia de riego (decimal).

E_{alm} – Eficiencia de almacenamiento (decimal).

EC – Eficiencia de conducción (decimal).

E_{apl} – Eficiencia de aplicación (decimal).

Donde no hay obra de almacenamiento, como son los sistemas de derivación y aprovechamiento de acuíferos con pozos profundos, la fórmula queda:

$$ER = EC * E_{apl}$$

ER – Eficiencia de riego (decimal).

EC – Eficiencia de conducción (decimal).

E_{apl} – Eficiencia de aplicación (decimal).

En la irrigación se han usado láminas de riego por unidad de superficie en lugar de volúmenes, debido a que facilitan el manejo de la información y de las cantidades que se obtienen utilizando menos cifras. Si los volúmenes se dividen por el tiempo de riego, la fórmula queda en función de gastos, y si los volúmenes se dividen entre la superficie regada con el sistema de riego, la eficiencia queda en función de láminas de agua.

$$ER = \frac{V_{et}}{V_{total}} = \frac{G_{et}}{G_{total}} = \frac{L_{rr}}{L_{total}}$$

ER – Eficiencia de riego (decimal).

V_{et} – Volumen necesario para la formación de tejidos (Mm^3), transpiración del cultivo y evaporación del suelo (Mm^3).

V_{total} – Volumen total extraído para riego (Mm^3).

G_{et} – Gasto de evapotranspiración (Mm^3), transpiración del cultivo y evaporación del suelo (m^3/s).

G_{total} – Gasto total extraído para riego (m^3/s).

L_{rr} – Lámina de requerimiento de riego (cm).

L_{total} – Lámina total (cm).

6.1.4. Pérdidas de agua en el riego por aspersión

Las pérdidas de agua corresponden a las deficiencias parciales del sistema de riego; esto es, a pérdidas en el almacenamiento, pérdidas en la obra de conducción y pérdidas en la aplicación.

En el caso de sistemas de riego por aspersión, se pueden presentar pérdidas en el almacenamiento, en la conducción y en la aplicación. Las primeras pueden ser por evaporación y filtraciones en el almacenamiento; las pérdidas en la conducción pueden ser por errores en la operación, filtraciones y fugas y, por último, *las pérdidas en la aplicación pueden ser: por falta de uniformidad en la lluvia, por arrastre y evaporación en el trayecto que sigue el agua del aspersor a la superficie del cultivo o del suelo y por falta de uniformidad de distribución hidráulica; no debe haber pérdidas por escurrimiento superficial. Las pérdidas por falta de uniformidad en la lluvia y por falta de uniformidad de distribución hidráulica deben ser las pérdidas por percolación intrínsecas del sistema de riego y puede haber excesos de aplicación que incrementarían la percolación.*

$$PA = P_{ull} + P_{aye} + P_{udh} + P_{cond} + P_{alm}$$

PA – Pérdidas de agua en el riego por aspersión (Mm^3).

P_{ull} – Pérdidas por grado de uniformidad de lluvia (Mm^3).

P_{aye} – Pérdidas por arrastre y evaporación (Mm^3).

P_{udh} – Pérdidas por uniformidad de distribución hidráulica (Mm^3).

P_{cond} – Pérdidas de agua en la conducción (Mm^3).

P_{alm} – Pérdidas de agua en el almacenamiento (Mm^3).

Nota: si se dividen los volúmenes por el área regada, las pérdidas se expresan en lámina (m).

6.1.4.1. PÉRDIDAS POR GRADO DE UNIFORMIDAD DE LLUVIA

Las pérdidas por uniformidad de lluvia se obtienen con datos de una evaluación del funcionamiento del sistema de aspersión en campo, tomando en cuenta los traslapes de lluvia y obteniendo el coeficiente de variación de la muestra representativa de la zona con gastos menores en los aspersores. A continuación, se presenta la fórmula:

$$P_{ull} = L_{rr} * \left(\frac{CV}{1 - CV} \right)$$

P_{ull} – Pérdidas por grado de uniformidad de lluvia (m).

L_{rr} – Lámina de requerimiento de riego (m).

CV – Coeficiente de variación de la lluvia de pruebas de aspersión (decimal).

6.1.4.2. PÉRDIDAS POR ARRASTRE Y EVAPORACIÓN

Las pérdidas en la aplicación también deben incluir, las correspondientes al arrastre y la evaporación en el trayecto que recorre el agua desde la boquilla del aspersor hasta la superficie de las plantas o del suelo. En el cuadro 6.1 se muestran las pérdidas por arrastre y evaporación típicas.

Cuadro 6.1. Pérdidas por arrastre y evaporación en sistemas de riego por aspersión.

SISTEMA DE RIEGO	PÉRDIDAS (%)
Fijos	8-10
Semifijos y regantes móviles	10-12
Cañones	6-10
Pivote y avance frontal	4-7

Para determinar estas pérdidas es necesario recurrir a las evaluaciones hidráulicas de campo.

$$P_{aye} = \frac{TR * G_{med asp}}{A_{asp}} - L_{med cap}$$

P_{aye} – Pérdidas por arrastre y evaporación (m).

TR – Tiempo de riego (h).

$G_{med asp}$ – Gasto medio de aspersores (Mm^3/h).

A_{asp} – Área del aspersor (m^2).

$L_{med cap}$ – Lámina media captada en los recipientes de la prueba (m).

6.1.4.3. PÉRDIDAS POR GRADO DE UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN HIDRÁULICA

Las pérdidas por falta de uniformidad de distribución hidráulica se obtienen de las pruebas de uniformidad de descarga de los aspersores, con la fórmula siguiente:

$$P_{udh} = L_{media} - L_{med\frac{1}{4}bajo}$$

P_{udh} – Pérdidas por uniformidad de distribución hidráulica (Mm^3).

L_{med} – Lámina media (m).

$L_{med\frac{1}{4}bajo}$ – Lámina media del cuarto bajo (m).

6.1.4.4. PÉRDIDAS EN LA CONDUCCIÓN

Las pérdidas en la conducción se pueden obtener por diferencia de volúmenes, considerando el extraído para riego y restándole el entregado para riego en la parcela.

$$P_c = V_{ext} - V_{ent}$$

P_c – Pérdidas por conducción (Mm^3).

V_{ext} – Volumen extraído (m^3).

V_{ent} – Volumen entregado (m^3).

6.1.4.5. PÉRDIDAS EN EL VASO

Cuando hay un vaso de almacenamiento que no tiene impermeabilización, se considera que tiene pérdidas por filtraciones y evaporación. En este caso se requiere analizar el funcionamiento del vaso, tomando en cuenta las entradas y salidas de agua. Generalmente se conocen datos mensuales de las entradas por río, lluvia y bombeo; las salidas por extracción y evaporación se pueden medir y estimar, y las filtraciones se calculan como pérdidas deducidas.

Se utiliza la ecuación siguiente:

$$P_{alm} = V_{ev} + V_{inf}$$

P_{alm} – Pérdidas de agua en el almacenamiento (Mm^3).

V_{ev} – Volumen evaporado en el almacenamiento (Mm^3).

V_{inf} – Volumen infiltrado en el almacenamiento (Mm^3).

$$V_{inf} = V_b + V_{li} - V_{ext} - V_{ev}$$

V_{inf} – Volumen infiltrado en el almacenamiento (Mm^3).

V_b – Volumen bombeado o entradas por escurrimiento en el vaso (m^3).

V_{ll} – Volumen llovido (m^3).

V_{ext} – Volumen extraído (m^3).

V_{ev} – Volumen evaporado (m^3).

6.2. Evaluación hidráulica

6.2.1. Bases de hidráulica para lograr la uniformidad

La evaluación hidráulica de un sistema de riego por aspersión es un trabajo por medio del que se puede conocer si el proyecto, instalación, operación y conservación se han hecho correctamente. El objetivo del buen desempeño del sistema de riego por aspersión es aplicar el agua de riego satisfaciendo las necesidades de agua y nutrimentos de los cultivos para la producción de altos rendimientos y con productos de calidad, con las pérdidas de volúmenes de agua implícitas en la alta eficiencia de riego y con contaminación mínima.

Para lograr buenas eficiencias de riego con alta uniformidad de aplicación, se requiere conocer los principios básicos de funcionamiento hidráulico del sistema de riego desde el equipo de bombeo hasta las tuberías regantes con aspersores.

6.2.1.1. PRESIONES Y GASTOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

Si se tiene la información correcta sobre los gastos y presiones de operación de un sistema de riego es muy simple organizar el plan de la evaluación y ejecutarlo, puesto que se tienen las condiciones en las que debe operar el sistema de riego por aspersión, en el cabezal de control, en las secciones de riego, en la tubería principal o en las entradas de agua a las tuberías regantes y en los aspersores en posiciones estratégicas del sistema.

En este caso, las medidas de corrección son muy simples porque los gastos y las presiones son biunívocos entre sí; es decir, hay sólo una correspondencia, por lo que si difieren los datos de operación con los de proyecto, únicamente hay que hacer los ajustes necesarios para que los gastos o las presiones correspondan a los indicados en las reglas de operación del sistema de riego para asegurar que opere en condiciones adecuadas para riego. Con este ajuste, se logra que el sistema funcione bien y nada más falta asegurar que se opere correctamente.

Para lograr lo anterior, es necesario conocer la lámina mínima de riego por hora que se aplica en la sección de riego, con la finalidad de determinar los tiempos de riego requeridos para aplicar la lámina de riego en esa sección. En la lámina por aplicar con el sistema de riego debe incluirse la lámina que se estima se perderá por arrastre y evaporación.

Para hacer los ajustes en la cuantificación de las láminas de riego que deben aplicarse a nivel de aspersores críticos (los de gasto mínimo), se requiere realizar trabajos de determinación de pérdidas de agua por arrastre y evaporación debidas al viento. Es importante hacer notar que el objetivo es regar sin tener déficits en la superficie del sistema de riego.

En la aplicación de este método de evaluación es muy importante tener las especificaciones técnicas del sistema de riego y del aspersor relativas a los gastos y presiones de operación, además de las presiones de operación y gastos de cada sección de riego.

Asimismo, es importante señalar que es más fácil medir presiones que gastos. Por ello es conveniente tener manómetros calibrados y confiables para usar el método de las presiones. Si no se cuenta con manómetros calibrados, es mejor aforar en la descarga de los aspersores.

Además de las presiones, la revisión por observación directa del funcionamiento del sistema tiene indicadores que pueden ser muy útiles, como el traslape que se presenta entre aspersores y entre tuberías regantes, porque si la lluvia de un aspersor alcanza el aspersor vecino o el radio de mojado es igual o mayor que el espaciamiento entre aspersores y entre regantes, se puede considerar que la uniformidad del riego es buena.

Cuando la presión es insuficiente en el aspersor, generalmente se reduce el radio de mojado y aumenta el tamaño de gota y, cuando es excesiva, el radio se incrementa un poco y tiende a reducirse el tamaño de gota.

6.2.1.2. RANGO DE GASTO O PRESIÓN DE OPERACIÓN DE ASPERORES

Mide la amplitud de los valores de la muestra y se calcula por la diferencia entre el valor más grande y el valor más pequeño del gasto o de la presión de operación de los aspersores. Entre menor sea el rango, mayor es la uniformidad de aplicación. Este criterio no aplica a pivotes centrales debido a que en estos sistemas de riego el gasto de los aspersores en la tubería regante debe ser mayor conforme se aleja su posición del pivote.

Si la diferencia de valores del gasto hidráulico de dos emisores en una sección o en un sistema de riego son los valores extremos del conjunto, entonces corresponden a los límites del rango.

A mediados del siglo pasado se consideró, con fines de cálculo hidráulico de tuberías con salidas múltiples, que si en una tubería la diferencia de descargas de las salidas no superaba el 10% del gasto del último emisor, en la práctica se podía considerar que las descargas eran iguales. También, desde el enfoque agronómico, se obtuvo la conclusión siguiente: si el rango de gastos es el 10% de la descarga del último emisor en una tubería regante, en una sección o en un sistema de riego, la uniformidad de emisión es alta y favorece al cultivo; esto se demuestra de la manera siguiente:

Se considera una sección de riego fija o una tubería regante a nivel, y que el diseño de la sección de riego o de la tubería regante plantea que la diferencia de descargas entre el primer y último emisor de la sección o, en su caso, de la tubería regante, correspondan con el 10% del gasto del último aspersor.

$$\text{Diferencia de gasto} = G_n - G_u = 0.10 * G_u$$

Entonces: $G_p = 1.10 * G_u$

Si se considera la media geométrica de los dos valores, se tiene que $G_m = (G_p * G_u)^{0.5}$:

Simplificando: $G_m = (1.10 * G_u * G_u)^{0.5} = 1.0488 * G_u$

Si definimos la eficiencia de distribución hidráulica como:

$$E_d = \frac{G_u}{G_m} * 100$$

Entonces, para cualquier valor del gasto del último emisor se tiene que:

$$E_d = \frac{G_u}{G_m} * 100 = \frac{G_u}{1.0488 * G_u} * 100 = 95.35 \%$$

Por lo tanto, la eficiencia de distribución hidráulica es alta (95.35%) y la uniformidad de emisión de los aspersores beneficia a los cultivos.

También es útil usar el rango de presiones, por lo que se presenta a continuación:

Para la misma diferencia de gastos, se tiene que: $G_u = K * H_u^{0.5}$ y que:

$$G_p = K * H_p^{0.5} = 1.10 * G_u = 1.10 * K * H_u^{0.5}$$

Entonces:

$$H_p^{0.5} = 1.10 * H_u^{0.5}$$

Elevando al cuadrado los miembros de la ecuación, se tiene que:

$$H_p = 1.21 * H_u$$

y, por último:

$$H_p - H_u = 0.21 * H_u$$

Por lo que, la diferencia de presión máxima aceptable entre dos emisores de una sección o del sistema de riego, no debe ser mayor del 21% de la presión de operación del último emisor, para que se sostenga el rango de variación del 10% de los gastos de los aspersores y se obtenga buena uniformidad hidráulica en el riego, como se observa en el cuadro 6.2.

Cuadro 6.2. Relación entre gastos y presiones de emisores, con la eficiencia de distribución hidráulica que generan, en una tubería operando a nivel.

DIFERENCIA DE GASTOS %	EFICIENCIA DE DISTRIBUCIÓN HIDRÁULICA %	DIFERENCIA DE PRESIÓN %
0	100.00	00
5	97.59	10
10	95.35	21
15	93.25	32
20	91.29	44
25	89.44	56

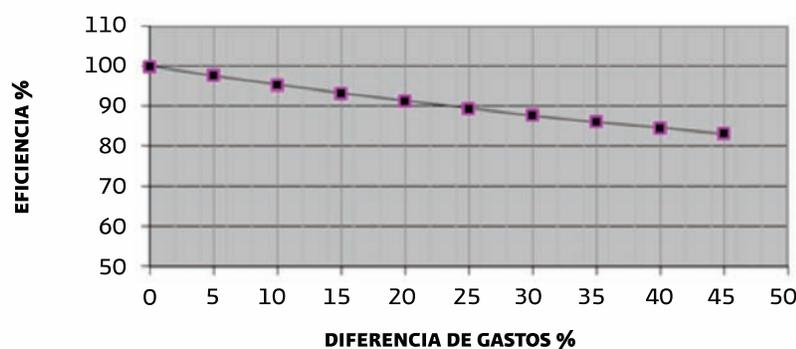


Figura 6.1. Relación entre gastos y presiones de emisores con la eficiencia de distribución hidráulica que generan, en una tubería operando a nivel.

Del análisis del funcionamiento de una tubería, se concluye que el rango de gastos es mejor indicador de variación que la eficiencia de distribución hidráulica, porque explica mejor la variación de láminas de riego. Se considera que la diferencia máxima permisible de descargas entre el aspersor de mínimo gasto y el de máximo gasto debe ser 10%; por lo tanto, si es mayor, se nota que está fuera de rango aceptable.

La eficiencia de distribución hidráulica es engañosa porque, a pesar de que haya una diferencia de descargas del orden de 30% en los aspersores, el valor de la eficiencia de distribución hidráulica es de 87.7%. Esta última no da idea clara del desperdicio de agua. Por esta razón, se aceptó de manera general la diferencia máxima del 10% en los gastos de los emisores en la tubería regante y en el sistema de riego, desde mediados del siglo pasado.

Al evaluar un sistema de riego por aspersión, midiendo las descargas de los emisores más y menos favorecidos por la presión de la sección o de la tubería regante, si se obtiene que la diferencia de gastos es menor que 10% del gasto del último emisor, o la diferencia de presiones de operación en los emisores críticos es menor que 21% de la presión de operación del último aspersor, se considera que la uniformidad es buena.

En el caso de los sistemas de riego de los pivotes centrales, los gastos o descargas de los aspersores no sirven para calcular la uniformidad de emisión porque están seleccionados con diferencias específicas para regar uniformemente, de acuerdo con su posición en la tubería regante. Para calcular la uniformidad de riego en los pivotes, deben utilizarse las láminas de riego que aplica el equipo a lo largo de la tubería y no deben exceder del 10% de la lámina de riego de la lámina menor obtenida.

6.2.1.3. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA TUBERÍA CON ASPERSORES

Para analizar el funcionamiento hidráulico de una tubería regante, se procedió a simular su funcionamiento. Para desarrollar el trabajo, se consideró la información siguiente:

Número de aspersores en la tubería = 26.

Ecuación carga-gasto del aspersor:

$$Q = 0.14 * H^{0.5}$$

Donde:

Q – Gasto del aspersor (l/s).

K – Constante ($cm^4/s \cdot kg^{0.5}$)

H – Presión de operación del aspersor (kg/cm^2).

x – Exponente del aspersor.

Datos del último aspersor: gasto = 0.250 l/s, operando con presión = 3.19 kg/cm^2 .

Fórmula de Manning. Coeficiente de fricción $C=0.009$.

Tubería a nivel. Diámetro interior = 75 mm. Longitud del tramo = 9 m.

Procedimiento: 1) Se calculó la pérdida de carga en el último tramo de tubería, considerando la posición del último aspersor al final de la tubería, por lo que se usó el gasto del último aspersor como gasto del tramo de tubo. 2) Se determinó la presión de operación del penúltimo aspersor, sumando la presión de operación del último aspersor con las pérdidas de carga del último tramo de tubería. 3) Luego, se sumó el gasto del último tramo, con el gasto del penúltimo aspersor, para calcular las pérdidas de carga en el penúltimo tramo. 4) Luego, se calculó paso a paso la presión de operación de cada aspersor para cada tramo de la tubería, tomando la presión y el gasto de operación del tramo anterior, más las pérdidas de carga en el tramo, calculadas con el gasto del tramo anterior más el gasto del último aspersor calculado.

Siguiendo el procedimiento, se obtuvieron los datos del cuadro 6.3, correspondientes a los gastos y presiones de cada aspersor de la tubería.

Se graficaron los datos y se presentan en la figura 6.2, donde se observa que si se quiere que el gasto de los emisores no rebase el 10% de la descarga del último aspersor, se debe operar con 16 aspersores en la tubería a nivel; si la tubería estuviera de subida serían menos y si estuviera de bajada, serían más.

Si se quisiera operar sin rebasar el 20% de diferencia máxima de descargas, se debería operar con 21 aspersores. Esto implica que aumenta sólo con cinco aspersores y duplica la descarga del emisor. Si se quiere operar con 30% de diferencia máxima de gastos, se incrementan otros tres aspersores y, por último, si opera con máximo permisible con 40% de diferencia de descargas, aumenta dos aspersores, porque con tres rebasa el gasto permisible. Esto puede observarse en el cuadro 6.3 o en la figura 6.2.

Cuadro 6.3. Gastos de los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante.

Núm. ORDEN	Q L/S	Núm. ORDEN	Q l/s
1	0.250	15	0.268
2	0.250	16	0.272
3	0.250	17	0.277
4	0.250	18	0.282
5	0.251	19	0.287
6	0.251	20	0.293
7	0.252	21	0.300
8	0.253	22	0.307
9	0.254	23	0.315
10	0.255	24	0.324
11	0.257	25	0.333
12	0.259	26	0.343
13	0.262	27	0.354
14	0.265		

Para analizar los datos como láminas de riego para interpretar desde el punto de vista de riego, se presentan en el cuadro 6.4 los volúmenes y láminas que se generan a partir de los gastos de los aspersores, considerando un tiempo de seis horas de operación y la superficie de riego por aspersor de 108 m². Al analizar la variación de gastos, volúmenes, láminas de riego y presiones de operación, se observa que los valores tienen incrementos numéricos significativos a partir de 10% de diferencia de gastos y gráficamente queda evidente.

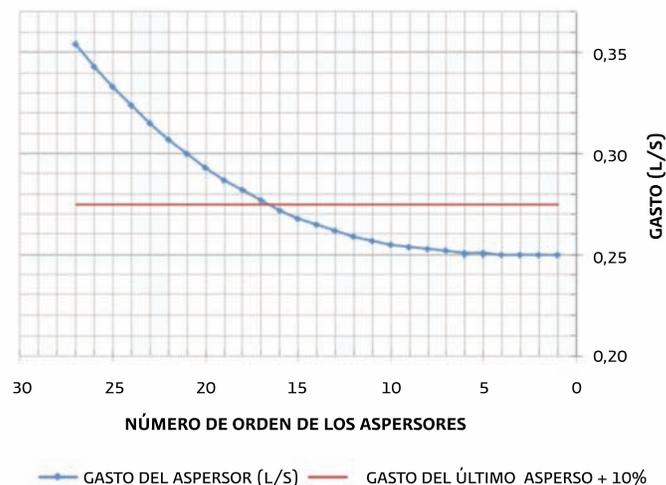


Figura 6.2. Gastos de los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante.

Los volúmenes y las láminas de riego emitidas por los aspersores corresponden a la misma diferencia que los gastos en porcentaje, puesto que los volúmenes son los gastos multiplicados por el tiempo de operación y las diferencias de láminas de riego también, debido a que son los volúmenes divididos entre la superficie de influencia de un aspersor.

Las láminas medias aplicadas con diferentes longitudes de tubería regante, se calcularon para todas las longitudes desde dos hasta 27 aspersores, y aparecen en la columna de LRM (lámina de riego media) del cuadro 6.4. Para 16 aspersores, la lámina bruta media fue 5.12 cm y correspondió a una eficiencia de distribución hidráulica de 97.64 por ciento.

Aun para la diferencia aproximada de 40% en gastos, se presenta una lámina bruta media de 5.507 cm. Esto significa que la lámina media excede en 10%, aproximadamente, a la lámina necesaria de proyecto de 5 cm, y la eficiencia de distribución hidráulica calculada fue de 90.79%. Esto significa que la mayoría de los aspersores aplica láminas de riego brutas menores que la media y, por eso, se sostiene alto el valor numérico de la eficiencia de distribución hidráulica. En el caso de aplicar fertilizantes por medio del sistema de riego, sólo en pocos aspersores se aplicaría el exceso fuerte de fertilizante.

Cuadro 6.4. Gastos, volúmenes y láminas de los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante y eficiencias hidráulicas de distribución.

N	Q L/S	H K/CM2	HF M	VOL. ASP M3	LRB CM	LRM CM	EDH %
1	0.25	3.189	0	5.4	5		
2	0.25	3.189	0.002	5.4	5	5.000	100.00
3	0.25	3.191	0.004	5.4	5	5.000	100.00
4	0.25	3.195	0.007	5.41	5.01	5.003	99.95
5	0.251	3.203	0.012	5.41	5.01	5.004	99.92
6	0.251	3.214	0.017	5.42	5.02	5.007	99.87
7	0.252	3.231	0.023	5.44	5.03	5.010	99.80
8	0.253	3.254	0.03	5.45	5.05	5.015	99.70
9	0.254	3.284	0.038	5.48	5.07	5.021	99.58
10	0.255	3.322	0.047	5.51	5.1	5.029	99.42
11	0.257	3.369	0.057	5.55	5.14	5.039	99.22
12	0.259	3.426	0.068	5.6	5.18	5.051	98.99
13	0.262	3.494	0.081	5.65	5.23	5.065	98.72
14	0.265	3.575	0.094	5.72	5.29	5.081	98.41
15	0.268	3.669	0.109	5.79	5.36	5.099	98.05
16	0.272	3.778	0.125	5.88	5.44	5.121	97.64
17	0.277	3.903	0.142	5.97	5.53	5.145	97.19
18	0.282	4.045	0.161	6.08	5.63	5.172	96.68
19	0.287	4.207	0.182	6.2	5.74	5.202	96.12
20	0.293	4.388	0.204	6.33	5.87	5.235	95.51
21	0.3	4.592	0.228	6.48	6.00	5.271	94.85
22	0.307	4.82	0.254	6.64	6.15	5.311	94.14
23	0.315	5.074	0.282	6.81	6.31	5.355	93.37
24	0.324	5.357	0.313	7	6.48	5.402	92.56
25	0.333	5.669	0.346	7.2	6.67	5.452	91.70
26	0.343	6.015	0.381	7.42	6.87	5.507	90.79
27	0.354	6.396	0.42	7.64	7.08	5.565	89.84

Sin embargo, en la figura 6.3 se observan con mayor facilidad las diferencias de láminas de riego: el aspersor 17 aplica el 11% del primero, el número 21 aplica el 20%, el número 24 aplica el 30% y el número 27 aplica un poco más del 40%. Esto implica que en costos de operación y uniformidad de aplicación, a partir de diferencias mayores al 10%, se incrementa rápidamente el costo de la energía para operar la tubería regante, porque para generar la diferencia de 40% en el rango de descargas de los aspersores debe incrementarse la presión de operación en 96 por ciento.

Por lo anterior, los riegos no deben proyectarse con la lámina media que aplica la tubería, porque la mayoría de los aspersores aplicaría menos que la media y el riego sería deficiente. Esto implica que los excedentes de lámina de riego son pérdidas de agua necesarias para regar bien el cultivo.

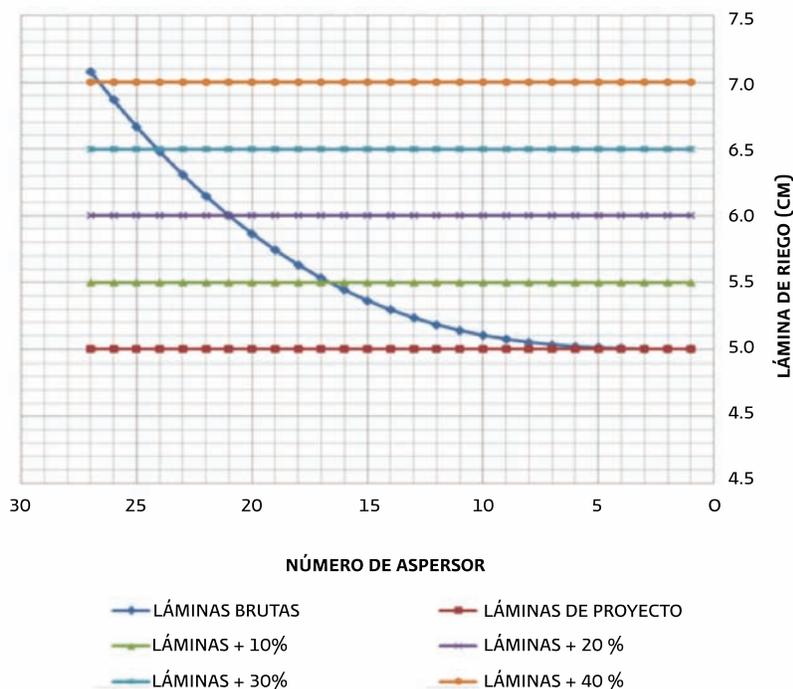


Figura 6.3. Láminas aplicadas por los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante y los incrementos cada 10%.

Considerando las pérdidas por arrastre y evaporación, se analiza la eficiencia de aplicación, suponiendo que la lámina de requerimiento de riego o lámina neta es de 4.5 cm. La eficiencia de aplicación del riego, obtenida con simulación con la tubería regante utilizando 17 aspersores, para obtener el rango de gastos igual a 10%, y se consideraron pérdidas de agua por arrastre y evaporación de 0.5 cm de lámina, por lo que se proyectó aplicar una lámina de 5 cm, con el aspersor de menor gasto. Luego entonces, tomando en cuenta el funcionamiento hidráulico de la tubería analizada anteriormente, resultó aplicar una lámina bruta media de 5.15 cm y, por lo tanto, la eficiencia de aplicación obtenida fue de 87.34%. En la figura 6.4 se presentan las láminas neta, de proyecto, bruta y bruta media de la tubería de riego por aspersión.

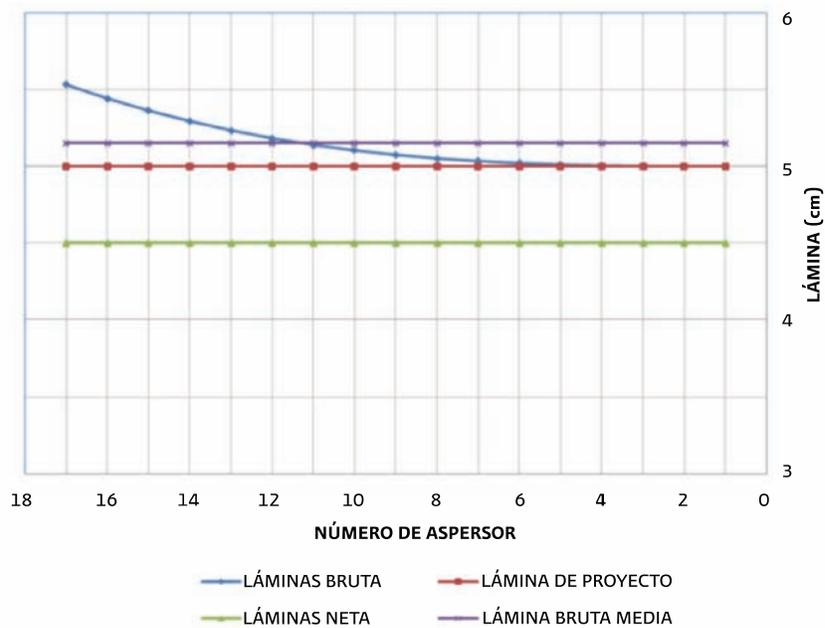


Figura 6.4. Láminas brutas aplicadas por los aspersores de acuerdo con su posición en la tubería regante, lámina bruta media, lámina neta, lámina de proyecto y con rango de 10%.

Ahora, simulando con la tubería de 21 aspersores y las condiciones de láminas neta, pérdidas por arrastre y evaporación, se obtiene el rango de gastos igual a 20%, y resulta la lámina bruta media de 5.27 cm. Así, la eficiencia de aplicación obtenida fue de 85.34%. En la figura 6.5 se presentan las láminas neta, de proyecto, bruta y bruta media de la tubería de riego por aspersión.

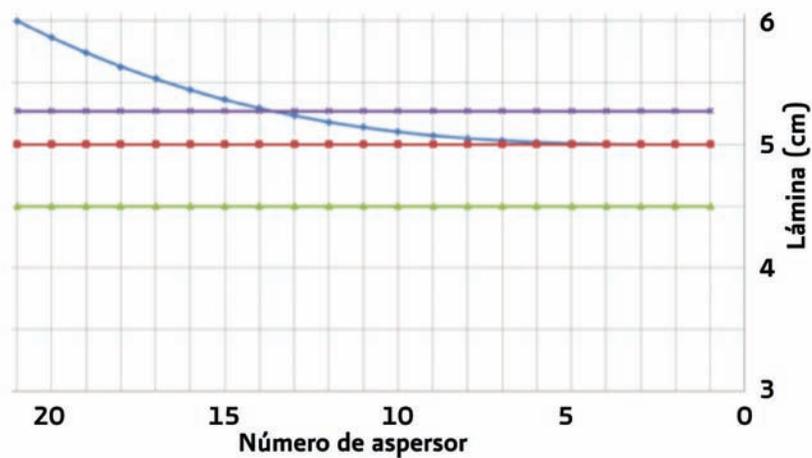


Figura 6.5. Láminas brutas aplicadas por los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante, lámina bruta media, lámina neta, lámina de proyecto y con rango de 20%.

Ahora, considerando que se utiliza la variante de tubería con 24 aspersores, se obtiene diferencia de gastos igual a 30%, y se requiere aplicar una lámina bruta media de 5.40 cm. Por lo tanto, la eficiencia de aplicación obtenida fue de 83.33%. En la figura 6.6 se presentan las láminas neta, de proyecto, bruta y bruta media de la tubería de riego por aspersión.

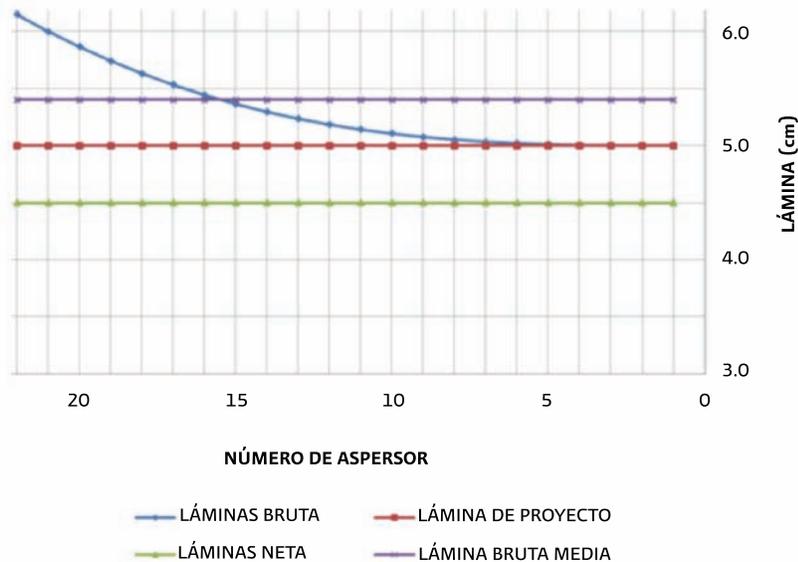


Figura 6.6. Láminas brutas aplicadas por los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante, lámina bruta media, lámina neta, lámina de proyecto y con rango de 30%.

Ahora, considerando que se utiliza la variante de tubería con 26 aspersores, se obtiene diferencia de gastos igual a 40% y se requiere aplicar una lámina bruta media de 5.51 cm. Por lo tanto, la eficiencia de aplicación obtenida fue de 83.33%. En la figura 6.7 se presentan las láminas neta, de proyecto, bruta y bruta media de la tubería de riego por aspersión.

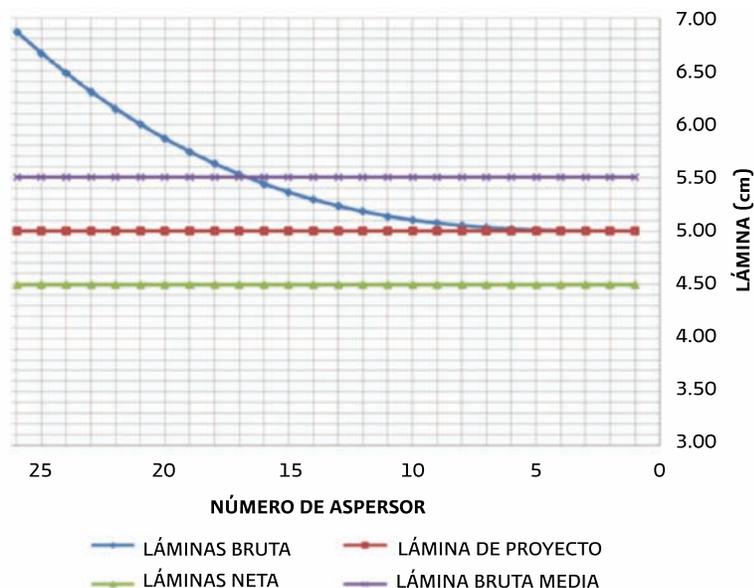


Figura 6.7. Láminas brutas aplicadas por los aspersores, de acuerdo con su posición en la tubería regante, lámina bruta media, lámina neta, lámina de proyecto y con rango de 40%.

Como resultado del análisis del funcionamiento hidráulico de la tubería, se concluye que:

Primero. Debe considerarse el requerimiento de riego como lámina neta.

Segundo. Se deben incluir las pérdidas por arrastre y evaporación, para calcular la lámina de riego que debe suministrarse con el último aspersor o con el aspersor de mínima descarga de la tubería regante.

Tercero. Debe considerarse el cálculo de la lámina promedio de la tubería regante, tomando en cuenta las pérdidas por falta de uniformidad de distribución hidráulica.

Cuarto. Es importante seguir la recomendación de que la diferencia máxima de descargas de los aspersores no exceda el 10% de la descarga del último emisor o de mínima presión de operación.

Quinto. Debe agregarse una lámina de compensación por falta de uniformidad de lluvia (como se muestra en el funcionamiento de aspersores o de una tubería regante).

6.2.2. Evaluación de los sistemas de riego

Con la finalidad de obtener el grado de desempeño de un sistema de riego por aspersión y las acciones que puedan realizarse para mejorarlo físicamente o mejorar su operación, se han usado parámetros indicadores de tres clases: a) el rango de presiones y gastos de operación, b) la uniformidad de la distribución hidráulica del agua generada por las descargas en el sistema de riego y c) la uniformidad con que se distribuye la lluvia artificial en el campo.

6.2.2.1. FACTORES QUE AFECTAN LA UNIFORMIDAD DE RIEGO DEL SISTEMA

A continuación, se presentan algunos de los factores que pueden influir en la uniformidad de riego que se genera durante la operación del sistema que aplica el agua.

Posición de los aspersores. La posición relativa de los aspersores en el sistema de riego puede generar ventajas para recibir más presión que otros y descargar más agua, o estar desfavorecidos y recibir menos presión y descargar menos agua; esto puede ser originado por las pérdidas de energía hidráulica en la red de tuberías o por los desniveles del terreno.

Como en los sistemas de riego fijos no cambian las posiciones de las tuberías de riego, las fallas en la uniformidad de la descarga de los aspersores se repiten en cada riego y pueden generar excesos o déficits de agua en el cultivo.

Generalmente, para contrarrestar este problema, se aplican láminas de riego más grandes que las necesarias para evitar que haya zonas con déficit de riego. En los sistemas móviles tiende a distribuirse la no uniformidad en el campo, conforme se cambian las posiciones de los aspersores y se minimiza el efecto que produciría sobre el cultivo. Se baja la eficiencia de riego y se asegura la producción.

Variación de topografía. La variación de gastos o no uniformidad del riego puede generarse en diferentes posiciones en el campo, principalmente como efecto de cambios en elevaciones del terreno o ubicación del aspersor en la sección o tubería regante. A mayores alturas relativas del aspersor, tendrá menor presión de posición y a menores alturas relativas del aspersor, tendrá mayor presión de posición, y la descarga es proporcional a la raíz cuadrada de la presión de operación.

Variación de la presión en las tuberías regantes y en los aspersores. Se presentan diferencias de gastos en los emisores por las diferencias de presiones hidráulicas que se generan en el funcionamiento de tuberías con salidas múltiples, por las pérdidas de energía o por la variación topográfica. A mayor presión mayor descarga y a menor presión menor descarga.

Presión de operación de las boquillas. Cuando las boquillas de los aspersores trabajan a presiones altas generan gotas pequeñas, y cuando la descarga o chorro sale con ángulo alto, se arrastran más fácilmente fuera de la zona de aplicación, bajando la uniformidad de la lluvia y se pueden presentar pérdidas por arrastre y evaporación mayores.

Cuando las presiones de operación son bajas, el tamaño de la gota es más grande y puede compactar el suelo y reducir la infiltración, o puede dañar las flores de algunos cultivos, por ejemplo el frijol. Con presión baja se reduce el radio de mojado.

Velocidad del viento. La velocidad del viento puede ser el principal factor de pérdidas por arrastre y evaporación, y al generar el arrastre de las gotas de agua tiende a reducir la uniformidad de la lluvia.

En algunos casos, se reduce un poco la presión de operación de los aspersores para generar gotas relativamente grandes, con la finalidad de contrarrestar el arrastre por el viento y la evaporación.

6.2.2.2. *EVALUACIÓN DEL SISTEMA CON PRESIONES Y GASTOS DE OPERACIÓN*

Con la finalidad de conocer si un sistema de riego por aspersión fijo o de movimiento intermitente se opera hidráulicamente bien, es conveniente utilizar el método de presiones y gastos de operación. Es el método más simple y práctico para supervisar la operación del sistema de riego.

Con la información del sistema de riego sobre los gastos y presiones de operación que se incluyen en la guía de operación, o en el expediente del proyecto, es muy simple organizar el plan de la evaluación, ejecutarlo y aplicar acciones de mejora en caso de ser necesario, debido a que se conocen las condiciones en las que debe operar correctamente. Para aplicar este método, es muy importante tener las especificaciones técnicas del aspersor sobre los gastos y sus presiones de operación.

Para aplicar el método de las presiones es indispensable tener manómetros calibrados o un manómetro calibrado de referencia para comparar con los que se usarán en campo. Es más

fácil medir presiones que aforar gastos en aspersores; además, es más económico conseguir manómetros que medidores de flujo.

Para evaluar un sistema de riego por aspersión se debe conocer si el equipo de bombeo está funcionando correctamente. Primero, se revisa la presión de operación del manómetro en el tubo a la salida de la bomba y también el gasto indicado en el medidor de flujo. Si están en el rango permisible, se considera que el equipo de bombeo trabaja correctamente.

Si el sistema sólo tiene medidor de presión, es conveniente utilizar la curva carga gasto del equipo de bombeo, que permite saber cuál es el gasto de operación al conocer la presión de trabajo de la bomba (esta relación biunívoca hace confiable el método). En el caso de que no se tenga la relación carga gasto, se necesita aforar los aspersores que operan simultáneamente o un muestreo representativo para obtener el gasto medio de los aspersores, para estimar el gasto del sistema de riego y verificar si corresponde con el del proyecto. Deben considerarse las fugas en caso de existir.

Evaluación del sistema por secciones de riego. Cuando se requiere obtener indicadores del desempeño de un sistema de riego con secciones de riego, se verifican y anotan las presiones y gastos de operación por sección, se comparan con los datos de proyecto y se verifica si cumplen. Si no cumplen, se hacen los ajustes en las válvulas de control para corregir las presiones de operación y se procede a verificar los gastos.

Cuando se requiere evaluar un sistema de riego con secciones de riego con superficies diferentes, para representar las condiciones medias de operación, el gasto o la presión medidos en cada sección, deberán ponderarse por la superficie para calcular la media de los parámetros:

$$Q_{med} = \frac{Q_1 * A_1 + Q_2 * A_2 + \dots + Q_n * A_n}{A_{total}}$$
$$P_{med} = \frac{P_1 * A_1 + P_2 * A_2 + \dots + P_n * A_n}{A_{total}}$$

Donde:

Q_{med} – Gasto medio (l/s).

Q_i – Gastos de las secciones (l/s).

A_i – Área de las secciones (ha).

P_{med} – Presión media (kg/cm²).

P_i – Presión de las secciones.

Evaluación de un sistema con medidor en el cabezal de control y manómetros. En la mayoría de los casos, sólo se cuenta con medidor y manómetros en el cabezal de control. En estas condiciones se requiere verificar presiones y gastos en diferentes partes del sistema de riego, por el procedimiento del manómetro con tubo de Pitot y con aforos directos en los aspersores de las tuberías regantes.

Para obtener el gasto medio de la sección o de la tubería regante, se recomienda medir presiones (en el caso de tener la ecuación del aspersor) o aforar de 9 a 16 aspersores distribuidos de manera que permitan representar toda la sección o la tubería regante que se analiza.

Basándose en la guía de operación del sistema de riego, se prepara un croquis del sistema de riego con los puntos de control (unidades de control de presión y gasto) y una libreta de registros. En una hoja de ésta, se anotan las presiones y gastos indicados para la operación normal del sistema de riego en el cabezal de control y en cada unidad de control autónoma de las secciones de riego. Se dejan columnas al lado para registrar las presiones y gastos medidos en cada punto durante los trabajos de campo en la evaluación. Con los resultados, se realizan los ajustes para corregir las diferencias de presión y gasto encontrados.

Con la finalidad de determinar las láminas aplicadas al cultivo y calcular la eficiencia de aplicación, se requiere determinar las **pérdidas de agua por evaporación y arrastre del viento**, para hacer correcciones adicionando éstas en la cuantificación de las láminas de riego que deben aplicarse a nivel de aspersores críticos (los de gasto mínimo).

Comparación del gasto de proyecto con la descarga medida. La diferencia de gastos encontrada entre la medida en la descarga del equipo de bombeo y la de proyecto o diseño, debe ser máximo de 5% del gasto de diseño del equipo de bombeo (rango de diferencia permisible), de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$DP_{med} = \frac{G_{proy} - G_{med}}{G_{proy}} \leq 0.05$$

Donde:

DP_{med} – Diferencia de gasto máxima permisible entre la descarga de la bomba y el gasto de proyecto (m^3/s).

G_{proy} – Gasto de proyecto (m^3/s).

G_{med} – Gasto medido en la descarga de la bomba (m^3/s).

Con la diferencia de gastos deberá hacerse el ajuste del tiempo de riego para cada sección. Si es positivo, debe aumentarse el tiempo de riego y, si es negativo, debe reducirse con la finalidad de compensar la diferencia de volúmenes. Debe comprobarse que no haya fugas que originen mayor descarga en la bomba con menor presión.

La diferencia entre el gasto mínimo y el máximo en una sección de riego o, en su caso, en una tubería regante, no debe ser mayor de 12% y se expresa de la siguiente forma:

$$DG_{max} = \frac{G_{máx} - G_{mín}}{G_{mín}} \leq 0.12$$

Donde:

$DG_{máx}$ – Diferencia de gasto máxima entre la descarga del emisor de mayor gasto y el gasto del aspersor de gasto mínimo (m^3/s).

$G_{m\acute{a}x}$ – Gasto máximo de emisores (m^3/s).
 G_{med} – Gasto mínimo de aspersores (m^3/s).

En el caso de los sistemas de riego de movimiento continuo como cañón viajero, pivote y lateral móvil, se deben utilizar láminas de riego:

Para la lámina en sistemas de movimiento continuo, la ecuación anterior cambia a:

$$DL_{max} = \frac{L_{m\acute{a}x} - L_{m\acute{i}n}}{L_{m\acute{i}n}} \leq 0.12$$

Donde:

$DL_{m\acute{a}x}$ – Diferencia de lámina máxima entre la lámina del emisor de mayor gasto y la lámina del aspersor de gasto mínimo (m^3/s).

$L_{m\acute{a}x}$ – Lámina máxima de emisores (cm).

L_{med} – Lámina mínima de aspersores (cm).

Reporte técnico. Se debe hacer un reporte indicando cuáles secciones de riego se encontraron funcionando con presiones de operación diferentes a las indicadas en la guía del operador y con el ajuste realizado para regularizar el sistema y obtener las eficiencias de proyecto.

Es muy importante que, si el sistema de riego no tiene la lámina de riego por hora que aplica, es indispensable obtenerla y dejarla definida para que el operador pueda saber la lámina de riego que aplica en función del tiempo que riega.

Si se pretende obtener parámetros para comparar sistemas de riego entre sí, puede reportarse la presión media de operación de todas las secciones de riego, su desviación estándar y su coeficiente de variación. Estos indicadores pueden fallar si la población no corresponde a una distribución normal o las desviaciones de la media se deben a sesgo y no a un proceso aleatorio.

6.2.2.3. EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA (UDH) O EFICIENCIA DE DISTRIBUCIÓN HIDRÁULICA

La uniformidad de distribución hidráulica de los gastos de los aspersores nos indica el grado de desempeño hidráulico del sistema de riego. Este indicador de uniformidad corresponde a las diferencias de intensidad de lluvia entre aspersores. Se basa en la cantidad de agua que suministran los aspersores a sus áreas de influencia y, como depende de sus presiones de operación, este factor de la -uniformidad es hidráulico. Los valores del indicador dependen de la magnitud de las diferencias de descargas de los emisores en el campo.

Si este indicador tiene un valor bajo, puede generar recomendaciones de cambiar diámetros de tuberías, de aspersores o de sus boquillas, con la finalidad de reducir las diferencias de descarga de los aspersores.

Cuando la diferencia de descargas máxima de los aspersores es de 10%, entonces del orden del 60 al 75% de los aspersores descargan caudales por debajo de la media, y del 40 al 25% descargan gastos mayores que la media, lo que se considera normal.

Para determinar la uniformidad de descarga de los emisores o aspersores en un sistema de riego, se aforan los emisores de la tubería regante o de la sección de riego para determinar el gasto medio de descarga, y se obtiene también la media de la cuarta parte de los valores menores obtenidos en las mediciones.

Cuando se muestrea para determinar la uniformidad hidráulica, es importante analizar la distribución de las tuberías en campo, la topografía y la posición del equipo de bombeo, con la finalidad de seleccionar la sección o los aspersores que deben ser aforados para determinar el parámetro de la uniformidad de la descarga de los emisores.

Para calcular la uniformidad hidráulica del sistema de riego, se sigue el procedimiento que se presenta a continuación:

Decisión del tamaño de la muestra. La toma de la muestra de aspersores por aforar se hace con base en el número de emisores por sección de riego, como se muestra en el cuadro 6.5.

Cuadro 6.5. Tamaño de la muestra de aspersores.

NÚM. DE ASPERSORES POR SECCIÓN	TAMAÑO DE MUESTRA
0-36	9
>36	16 - 64

Procedimiento

1) Se selecciona una tubería regante o una sección de riego que tenga las características representativas del área de riego, de preferencia en un 75% del conjunto del sistema y, además, también debe incluir el tramo de tubería o el área de la sección que esté en las condiciones más difíciles (regantes de las más largas, en contra pendiente o con pendientes mayores del 5%).

2) Cuando se estudia una tubería regante, se muestrea toda la tubería. De preferencia se debe obtener el 60% de los datos de la muestra en la parte que tenga presiones menores, el 20% en la parte que tenga las descargas o presiones mayores y, el resto, en la zona media. En el caso de muestrear un sistema por secciones, en cada una se eligen cuatro laterales o regantes, de tal forma que una sea la más cercana a la unidad de control autónoma; otra, la más alejada; la tercera, situada a un tercio de la longitud que separe a las dos primeras (figura 6.8) y, la cuarta, a dos tercios.

En cada una de estas tuberías laterales o regantes, se seleccionan cuatro posiciones de emisores: la primera, la más cercana al punto de alimentación de la regante; la última, la más alejada y, entre ambas, las situadas a un tercio y dos tercios de la separación entre las dos primeras (figura 6.8).

3) Cuando el tamaño de muestra es 16, en cada sitio se afora un emisor. Si el número de emisores a muestrear es mayor de 36, en cada una de las posiciones indicadas anteriormente (16 posiciones) se toman emisores adyacentes y, de esta forma, se completa el número de emisores de muestreo indicado.

Nota: en el caso de encontrar un emisor obstruido o tapado parcial o totalmente, se debe registrar el problema y seleccionar uno adyacente para la prueba.

4) Se pone a funcionar el sistema, de acuerdo con las condiciones normales de operación.

5) Las lecturas de las descargas de los aspersores deben ser tomadas después de que han empezado a funcionar bien; esto es, que debe haberse leído la presión de operación y autorizar el inicio de la prueba.

6) Se recoge en un recipiente el agua que sale en cada emisor seleccionado, con capacidad de recibir el volumen proyectado en el tiempo de muestreo. El tiempo de muestreo debe garantizar la precisión de muestreo proyectada. Se miden los volúmenes mediante recipientes y una probeta debidamente calibrados, y se anota el resultado individualizado en un formato preparado en la libreta.

Error en el muestreo. Se presenta, a continuación, un ejemplo para determinar el tiempo de captación del agua descargada por el aspersor:

Se requiere saber el tiempo necesario para obtener aproximadamente un error del 2% en el aforo.

Si se tiene un aspersor con descarga de 0.250 l/s, considerando que el tiempo necesario para poner la manguera con la descarga del emisor en la entrada del recipiente es un segundo, y que el tiempo para quitarla es otro segundo, los casos críticos que pueden presentarse son: 1) tardar un segundo en iniciar las lecturas, lo cual significa que durante un segundo entra agua al recipiente sin contabilizar el tiempo, y 2) que al indicar que dejen de introducir agua al recipiente, se reaccione un segundo tarde, lo cual implica que se agregue otro volumen de agua unitario. Por lo tanto, el volumen aportado en dos segundos es 0.5 litros de exceso.

Si el caso es que se retrasó el inicio y se adelantó el final del aforo, el volumen es de déficit. En los casos intermedios se compensan las aportaciones de exceso o de déficit, por lo que se compensan.

Para que el error sea igual o menor al 2%, el volumen del recipiente que se necesita utilizar se calcula de la siguiente manera:

El 2% se considera el volumen correspondiente al tiempo de dos segundos de operación del aspersor. Como el gasto es 0.250 l/s, el volumen de error sería 0.5 l; entonces, el 100% corresponde a:

$$V = \frac{100 * 0.5}{2} = 25 \text{ l}$$

Donde:

V – Es el volumen del recipiente para aforar.

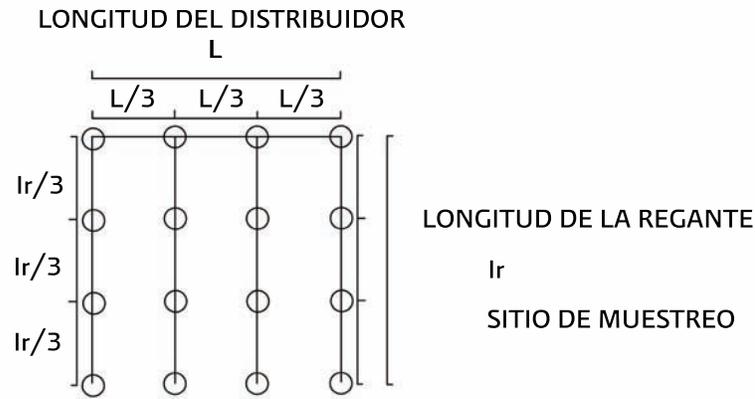


Figura 6.8. Elección de los emisores o sitios de muestreo en una subunidad o sección de riego.

7) Obtención del gasto o descarga media. Se calcula la media aritmética de los gastos obtenidos en las mediciones de la prueba, por sección de riego.

Para el caso de los valores máximo y mínimo, calcularlos de la manera siguiente:

Determinación del gasto mínimo. Se ordenan de mayor a menor los gastos o descargas de los emisores obtenidos en cada medición y se selecciona el 25% de los valores menores. Luego, se les calcula la media aritmética y se considera como gasto mínimo.

$$UDH = \left(\frac{Q_{m \frac{1}{4}bajo}}{Q_m} \right) * 100$$

UDH – Uniformidad de distribución hidráulica (%).

$Q_{m \frac{1}{4}bajo}$ – Gasto medio del cuarto bajo (l/s).

Q_m – Gasto medio (l/s).

Cuando se requiere conocer el rango, eliminando los valores extremos, se determina el gasto máximo medio, ordenándose de mayor a menor los gastos o descargas de los emisores obtenidos en cada medición, y se selecciona el 5% de los valores mayores. Luego, se les calcula la media aritmética y se considera como gasto máximo. Se resta la media máxima de la media mínima y se obtiene el rango sin valores extremos.

6.2.2.4. EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE LA LLUVIA

Estudiar la uniformidad de la lluvia nos permite inferir recomendaciones para que el productor realice acciones de mejoras físicas o de operación del sistema, de acuerdo con los resultados de la evaluación.

Con la finalidad de caracterizar la uniformidad de lluvia, se han empleado los indicadores de uniformidad siguientes: el coeficiente estadístico, la uniformidad de lluvia calculada con el cuarto bajo de la lluvia de los aspersores y el coeficiente de uniformidad de Christiansen.

Otros autores, en su intención de que se exprese la uniformidad de riego del sistema mediante un solo indicador numérico, han integrado en una expresión la uniformidad hidráulica y la uniformidad de la lluvia, haciendo más difícil interpretar las fallas del sistema y complicando hacer recomendaciones para mejorarlo. Una de estas propuestas se incluyó en el capítulo 1.

En el caso de obtener niveles bajos en el coeficiente uniformidad, se debe registrar la información de los factores que causan la baja uniformidad, como puede ser el viento, espaciamiento muy grande entre aspersores o entre líneas regantes. Para hacer ajustes o modificaciones y mejorar la distribución del agua asperjada, se puede traslapar más la lluvia de los aspersores, reduciendo su espaciamiento, tanto en la tubería de los aspersores como entre las tuberías regantes, o se puede bajar la presión de operación para obtener gotas de mayor tamaño para reducir la evaporación y el arrastre de agua por el viento.

Para complementar la información de las pruebas de uniformidad de lluvia es conveniente tener información de medidas ambientales, como son:

Viento. Registrar la velocidad y dirección del viento durante el periodo de la prueba y dibujar los sitios de las pruebas sobre un esquema. La velocidad y dirección del viento deberían ser monitoreados a intervalos no mayores de 15 minutos y registrarse. Las condiciones del viento deberían ser representativas de las condiciones de operación normal del sistema de riego. Velocidades del viento mayores a 3 m/s pueden tener efectos significativos sobre la uniformidad de aplicación.

Evaporación. Determinar la tasa de evaporación usando colectores de lluvia, como evaporímetros o similares a los utilizados como pluviómetros.

Otras variables. Registrar el estado del tiempo, la temperatura y la humedad relativa, medida o estimada durante la prueba el día de la evaluación.

Ubicación de la prueba. Si el área de riego esta a nivel, la localización más fácil de la prueba es generalmente donde se espera que se presenten las presiones de operación más bajas del sistema de riego, o sea, en los extremos de las tuberías. Si el sitio es desnivelado, debe hacerse un muestreo de presiones para seleccionar un área con presiones mínimas, que corresponderán a las precipitaciones mínimas generadas por los aspersores.

Topografía y elevación. Si el campo no está a nivel, determinar las diferencias de elevación entre los sitios de las pruebas y a lo largo del sistema como un todo. Si el relieve del terreno varía significativamente, es necesario considerar varios sitios de prueba para concluir sobre la uniformidad de aplicación del sistema de riego, de acuerdo con el diseño y las recomendaciones de operación.

Duración de la prueba en sistemas fijos. El tiempo de duración seleccionado para la prueba debería ser igual al tiempo de riego, o asegurar el volumen suficiente en los colectores para las mediciones que se requieren. Para sistemas fijos con tiempos largos de operación, se pueden usar tiempos menores.

Registrar la duración de la prueba y el tiempo normal de operación de cada posición. Asegurar los ajustes de cálculos con los ajustes de tiempos.

Preparación de la red de recipientes para la prueba de evaluación en sistemas fijos y portátiles mecanizados.

A. Cuando operan dos tuberías regantes con el espaciamiento normal:

Arregle una malla de colectores para captar la lluvia de seis aspersores adyacentes (tres aspersores en cada una de las dos tuberías), ubicados en la zona de menor precipitación del sistema de riego. La malla de colectores debe trazarse dentro del área de los seis aspersores. Se sugiere definir las columnas de colectores como las líneas perpendiculares a la hilera de aspersores, y filas de colectores como las líneas paralelas a las tuberías con los aspersores.

B. Cuando opera sólo una tubería regante:

Arregle una malla de colectores tomando tres aspersores adyacentes (tres aspersores juntos en una tubería regante) en una parte del sistema de riego que corresponda a la menor lámina de riego. La malla debe trazarse entre los aspersores de la orilla y extenderse a los dos lados de la tubería. Se sugiere que las columnas de colectores se consideren como las líneas perpendiculares a la hilera de aspersores, y filas de colectores como las líneas paralelas a las tuberías con los aspersores. ***Deberá simularse el traslape entre las tuberías para hacer las determinaciones de coeficiente de uniformidad. Con la finalidad que represente la uniformidad de riego real, será necesario usar el espaciamiento entre tuberías regantes del sistema de riego.***

Malla para pruebas de uniformidad en sistemas de laterales móviles de avance frontal y cañones. Se puede poner una línea de pluviómetros en la dirección perpendicular a la del movimiento del equipo de riego. En el caso de poner cuadrícula de colectores, defina columnas de colectores como las líneas perpendiculares a las hileras de los hidrantes y, como fila de colectores, a las líneas paralelas a las hileras de los hidrantes.

El espaciamiento mínimo entre colectores debería ser del orden de 2 m, y el máximo debería ser aproximadamente de 10 m, de acuerdo con el sistema de riego y el tipo y tamaño del aspersor.

Es conveniente asegurar que el espaciamiento entre columnas de colectores sea un submúltiplo del espaciamiento entre las líneas de aspersores. Asegurarse que la primera y última columnas de colectores estén posicionadas a un medio del espaciamiento entre columnas de las dos líneas de aspersores de la prueba.

Asegurar que el espaciamiento entre hileras de colectores sea un submúltiplo del espaciamiento entre aspersores, asegurar que la primera hilera de colectores está posicionada a un medio del espaciamiento entre colectores, y medir y registrar la posición de cada colector en la malla.

El sistema debería apagarse antes de que las lecturas de precipitación en los colectores se empiecen. Sin embargo, si la evaporación es significativa, el sistema debería ser apagado y los colectores leerse después del riego, con los ajustes propios por evaporación. Registrar las láminas calculadas de cada colector que serán sometidas al análisis de uniformidad.

Al final de la prueba no olvidar de verificar la necesidad de hacer ajustes de las lecturas de los colectores de lluvia porque las pérdidas de evaporación alteran la lámina total captada. Esto, sumando la evaporación que se obtiene del evaporímetro o colector usado como evaporímetro, a la precipitación en los recipientes colectores. Esto es muy importante en zonas áridas.

Área regada por la tubería regante. Determinar la longitud y ancho de la franja húmeda del área regada, extendiéndose aproximadamente 75% del radio de mojado en el caso de los aspersores de la orilla; esto es, aspersores que no tienen traslape. En el caso de que los aspersores mojen mayor distancia que el espaciamiento entre tuberías de aspersores y que el espaciamiento entre aspersores, sólo tomar en cuenta el área en estudio y sobreponer la precipitación de las orillas como otro traslape.

Presión o gasto del aspersor. Asegurarse que los aspersores escogidos son de las mismas especificaciones, medir las presiones o gastos de los aspersores seleccionados para la prueba y utilizar formatos o la libreta de campo para registrar los datos. Debe estar bien identificado cada emisor por su posición en el campo.

En el caso de medir presiones en los aspersores, usar manómetro con tubo Pitot y procurar no alterar el flujo en la boquilla tratando de medir lo más próximo posible de la salida del chorro.

En el caso de los gastos, capturar todo el flujo del aspersor sin ahogar la boquilla o afectar la presión de operación. Usar una manguera adaptada a la salida del aspersor y descargar en un recipiente con volumen apropiado para obtener un 2% de precisión en el aforo.

Mida y registre el tiempo, en segundos, que tarda en llenarse el recipiente. Procure que el recipiente tenga entrada delgada (cuello) para aforar en esa parte y obtener mayor precisión.

Cálculo de la evaluación de la uniformidad de aplicación del agua al cultivo. En cada sitio de muestreo se debe tomar en cuenta el tiempo de riego seleccionado para la prueba, considerando el traslape real de campo y, por lo tanto, se utiliza el volumen total que debería precipitar en cada punto.

La muestra de precipitación debe ser representativa del sistema de riego. En el caso de que la tubería regante esté a nivel, el área de muestreo deberá estar en la parte final de la tubería, considerando una longitud correspondiente al 25% de los aspersores, medido a partir de la punta de la tubería o del tapón, para tratar de obtener aspersores que funcionen con la presión de operación media del cuarto bajo.

Cuando se presentan desniveles topográficos, es conveniente hacer mediciones de presión con tubo de Pilot en los orificios de los aspersores, y seleccionar el área en donde se presenten las presiones bajas de operación.

Para evaluar esta uniformidad de aplicación del agua en sistemas de riego fijos y móviles, exceptuando pivotes, se utilizan el coeficiente de uniformidad de Christiansen y el coeficiente de variación estadístico.

a) Coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC).

$$CUP = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n D_i |V_i - V_m|}{\sum_{i=1}^n V_i * D_i} \right) * 100$$

Donde:

CUC – Coeficiente de uniformidad de Christiansen.

V_i – Volumen captado en el recipiente i ésimo (cc).

V_m – Volumen medio captado en la muestra (cc).

n – Número de recipientes de captación.

b) Eficiencia estadística (EE) o coeficiente estadístico de riego (CER).

$$EE = CER = \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2}{n - 1}}}{V_m} \right) * 100$$

c) Para determinar la uniformidad de aplicación del agua en los pivotes, se consideran las áreas de influencia regadas por cada aspersor o por cada anillo representado por un pluviómetro o recipiente de captación. Esto es de gran importancia, porque los aspersores que riegan al final de la tubería dominan superficies mayores que los aspersores cercanos al centro o pivote.

Coeficiente de uniformidad para pivotes (CUP).

$$CUP = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n D_i |V_i - V_m|}{\sum_{i=1}^n V_i * D_i} \right) * 100$$

Donde.

CUP – Coeficiente de uniformidad de Christiansen adaptado a pivotes.

V_i – Volumen captado en el recipiente i ésimo (cc).

V_m – Volumen medio captado en la muestra (cc).

D_i – Superficie dominada o considerada para el recipiente de captación i , o también la posición ocupada por el pluviómetro i , empezando con el 1, el más cercano al centro del pivote y n el más alejado (m^2).

n – Número de recipientes de captación.

d) Eficiencia estadística (EE) o coeficiente estadístico de riego (CER) para el caso de pivotes centrales. Para determinar la eficiencia estadística de aplicación del agua en los pivotes, se utiliza la fórmula considerando la ponderación por las áreas de cada anillo regado.

$$EE = CER = \left(1 - \frac{1}{\frac{\sum V_i D_i}{\sum D_i}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \frac{\sum V_i D_i}{\sum D_i})^2 D_i}{\sum_{i=1}^n D_i}} \right) * 100$$

V_i – Volumen captado en el recipiente i ésimo (cc).

D_i – Superficie dominada o considerada para el recipiente de captación i , o también la posición ocupada por el pluviómetro i , empezando con el 1, el más cercano al centro del pivote y n el más alejado (m^2).

Ejemplo 3. Análisis de la lluvia de un aspersor estándar.

Se requiere analizar y seleccionar el traslape necesario para regar uniformemente con una tubería regante de un sistema de riego por aspersión. Para hacer el trabajo, se llevó al cabo una prueba de operación de una tubería regante en una posición normal. Se trazó e instaló una red de pluviómetros, en los que se captaron volúmenes de lluvia y se transformaron a láminas para interpretar directamente como paámetros de riego. Con los resultados se elaboró el cuadro 6.6.

Cuadro 6.6. Láminas medidas en una prueba de evaluación de una tubería regante.

C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0.80	2.54	5.34	6.10	6.61	5.84	5.34	3.05	0.76	0.00	0.00
2	0	0.80	2.60	5.20	6.30	7.24	6.86	4.70	2.60	0.51	0.00	0.00
3	0	0.90	2.80	5.34	6.61	7.88	7.88	4.07	2.16	0.25	0.00	0.00
4	0	0.90	2.70	4.90	6.00	8.01	7.88	3.94	2.29	0.64	0.00	0.00
5	0	0.80	2.54	4.07	5.59	8.13	7.88	3.81	2.41	1.02	0.00	0.00

Se simuló el traslape de la tubería regante, ocupando tres condiciones de traslape: la primera con traslape en dos columnas de recipientes, la segunda con traslape en cuatro columnas y, la tercera, traslapando seis columnas, que fue el máximo traslape. Se calcularon los parámetros estadísticos y se organizó la información en el cuadro 6.7.

Cuadro 6.7. Parámetros estadísticos obtenidos del área regada con la tubería regante y caracterizada con diferentes condiciones de traslape.

CONCEPTO	SIN TRASLAPE	TRASLAPE 2 COL	TRASLAPE 4 COL	TRASLAPE 6 COL
Media	3.08	3.69	4.61	6.15
Desv. Est.	2.82	2.70	2.22	1.10
Coef. Var.	0.92	0.73	0.48	0.18
Coef. Est. Rgo.	8.25	26.93	51.99	82.09
Cu Crist.	19.17	46.53	72.03	92.64
Rango	8.13	8.13	6.98	3.52

Se observa claramente que sin traslape la uniformidad es muy baja y que, conforme se traslapa la lluvia, se mejora, se reduce la dispersión de valores y aumenta el coeficiente de uniformidad. Se concluye que el mejor traslape fue el de seis columnas. Sin embargo, al observar los datos originales, se ve que hay de un lado una columna con ceros y del otro lado dos columnas con ceros, por lo que se podría mejorar el riego si se tuviera un aspersor de mayor alcance o que se cerrará el espaciamiento entre tuberías de riego, porque la uniformidad todavía resultante es baja y se puede mejorar.

En la gráfica 6.9 se observa, en la parte superior izquierda, cómo queda una zona sin regar entre las dos posiciones de la tubería regante. En la parte superior de la derecha se observa que el traslape inicia el mejoramiento de la uniformidad. En la parte inferior izquierda, se observa que el traslape produce el efecto de aumentar las láminas aplicadas en la zona entre las dos líneas regantes y, por último, en la parte inferior derecha, se observa que el traslape mejoró mucho la uniformidad de lluvia.

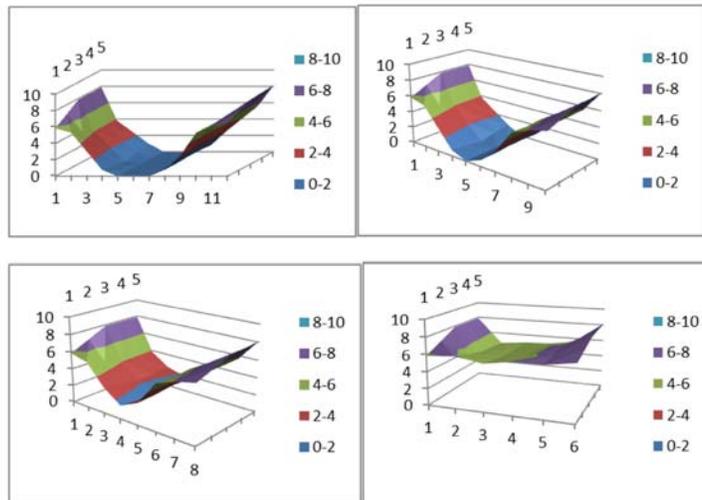


Figura 6.9. Uniformidad del riego de una tubería de aspersores, sin y con traslapes entre tuberías.

6.2.2.5. EVALUACIÓN GLOBAL DE LA EFICIENCIA

Con la finalidad de regar bien, sin déficits, es necesario conocer las partes que se deben integrar en la lámina de riego, de manera que se evite tener deficiencias de agua en el área cultivada.

Las componentes que deben sumarse son: la lámina de requerimiento de riego, la lámina para cubrir los déficits que se reportan por la falta de uniformidad de lluvia, la lámina correspondiente a las pérdidas por arrastre y evaporación, la lámina que debe compensar la falta de uniformidad hidráulica, y las láminas correspondientes a las pérdidas por conducción y a las pérdidas en el almacenamiento.

Considerando que debe satisfacerse el requerimiento de riego (RR) y que también debe aplicarse la lámina de riego necesaria para compensar la falta de uniformidad en la lluvia o pérdidas por uniformidad de lluvia (P_{ull}), es indispensable calcular la lámina de riego neta (LRN) por aplicar en la parcela, integrando los dos conceptos. Para esto se usa la eficiencia estadística (EE) o coeficiente estadístico de riego (CER), obtenido de prueba de campo local o de valores propuestos para proyectos, y se tiene que:

$$LRN = \frac{RR}{EE} = \frac{RR}{(1 - CV)}$$

$$EE = CER = (1 - CV) = \frac{RR}{RR + P_{ull}} = \frac{RR}{LRN}$$

Donde:

$$P_{ull} = LRN - RR$$

Ahora, introduciendo las pérdidas por arrastre y evaporación en el análisis:

Considerando que debe satisfacerse la lámina de riego neta (LRN) y que también debe aplicarse la lámina de riego necesaria para compensar las pérdidas por arrastre y evaporación, es indispensable calcular la lámina ajustada por arrastre y evaporación (LRA_{aye}), integrando los dos conceptos. Para esto se usa la eficiencia por arrastre y evaporación (E_{aye}), obtenida en la prueba de campo o con un valor de proyecto de acuerdo con la zona climatológica y se tiene que:

$$LRA_{aye} = \frac{LRN}{EA_{aye}}$$

$$EA_{aye} = \frac{LRN}{LRA_{aye}} = \frac{LRN}{LRN + P_{aye}}$$

$$P_{aye} = LRA_{aye} - LRN$$

Se tiene que satisfacer la lámina ajustada por arrastre y evaporación (LRA_{aye}), y ajustarla con la eficiencia de uniformidad de distribución hidráulica (EA_{udh}) obtenido en la evaluación del sistema de riego o de datos para proyecto, obteniéndose la lámina de riego ajustada por pérdidas generadas por la falta de uniformidad hidráulica (LRA_{udh}):

$$LRA_{udh} = \frac{LRA_{aye}}{EA_{udh}}$$

$$EA_{udh} = \frac{LRA_{aye}}{LRA_{udh}}$$

Por lo que las pérdidas por falta de uniformidad hidráulica (P_{udh}) se calculan de la manera siguiente:

$$P_{udh} = LRA_{udh} - LRA_{aye}$$

Se tiene que satisfacer la lámina de riego ajustada por las pérdidas generadas por la falta de uniformidad hidráulica (LRA_{udh}), y ajustarla con la eficiencia de conducción (EC), obteniéndose la lámina de riego ajustada por las pérdidas generadas por la conducción del agua en la red de distribución (LRC):

$$LRC = \frac{LRA_{udh}}{EC}$$

$$EC = \frac{LRA_{udh}}{LRC}$$

$$P_{cond} = LRC - LRA_{udh}$$

Por último, tomando en cuenta la lámina correspondiente a las pérdidas en el almacenamiento, y sumándolas a la lámina ajustada por conducción, se llega a la lámina de riego bruta, por lo que se puede expresar de la siguiente manera:

$$LB = \frac{LRC}{E_{alm}}$$

$$E_{alm} = \frac{LRC}{LB}$$

$$P_{alm} = LB - LRC$$

Por último, la eficiencia global corresponde a:

$$EG = \frac{RR}{LRB}$$

$$LRB = \frac{RR}{EG}$$

Para que la eficiencia global sea aceptable, se requiere que el producto de las eficiencias parciales sea igual a la eficiencia global. Por lo que se tiene:

$$EG = EE * EA_{aye} * EA_{udh} * EC * E_{alm}$$

Esto se comprueba a continuación:

$$EG = \frac{RR}{LRN} * \frac{LRN}{LRA_{aye}} * \frac{LRA_{aye}}{LRA_{udh}} * \frac{LRA_{udh}}{LRC} * \frac{LRC}{LB}$$

Entonces:

$$EG = \frac{RR}{LB}$$

También, la lámina bruta se puede expresar de la manera siguiente:

$$LB = RR + P_{ull} + P_{aye} + P_{udh} + P_{cond} + P_{alm}$$

Entonces, las pérdidas totales son:

$$P_{total} = LB - RR = P_{ull} + P_{aye} + P_{udh} + P_{cond} + P_{alm}$$

Ejemplo 4. Se requiere proyectar la aplicación de agua a un cultivo para satisfacer su requerimiento de riego, estimado en 5 cm, con un sistema de riego que tiene aprovechamiento

de pozo profundo y sistema de riego por aspersión. El aprovechamiento no cuenta con estanque de almacenamiento, por lo que no hay pérdidas por ese concepto. Como no existe proyecto o información técnica del sistema de riego, se realizó un estudio de evaluación de su funcionamiento y se obtuvieron los resultados siguientes:

Las pérdidas en la conducción corresponden al 2% del gasto que se conduce por el sistema entubado y se deben a fugas en empaques y válvulas.

Espaciamiento entre tuberías = 12 m.

Espaciamiento entre aspersores = 9 m.

De la prueba de uniformidad de lluvia de una hora se obtuvo:

La lámina media captada en los pluviómetros:

$LR_{cap} = 7.79$ mm.

La desviación estándar $DEST = 1.102$.

El coeficiente de variación: $CV = 0.1414$.

El coeficiente de uniformidad estadística: $CUE = 0.8586$.

El rango fue: $R = 3.52$ mm.

Se hizo un estudio de la uniformidad de distribución hidráulica por simulación de la tubería de riego por aspersión y resultaron los siguientes gastos en los aspersores:

Cuadro 6.8. Resultados del cálculo de la descarga de los aspersores.

N	Q L/S	N	Q L/S
1	0.25	10	0.255
2	0.25	11	0.257
3	0.25	12	0.259
4	0.25	13	0.262
5	0.251	14	0.265
6	0.251	15	0.268
7	0.252	16	0.272
8	0.253	17	0.277
9	0.254		

El gasto medio en la tubería regante: $Q_m = 0.2574$ l/s.

Gasto medio del cuarto bajo: $Q_{m1/4bajo} = 0.2502$.

$$UDH = \left(\frac{Q_{m\frac{1}{4}bajo}}{Q_m} \right) * 100 = \left(\frac{0.2502}{0.2574} \right) * 100 = 97.2$$

Uniformidad de distribución hidráulica = 0.972.

La lámina de riego aplicada por los aspersores fue:

$$LR_{aplic} = \left(\frac{0.2502 * 3600}{12 * 9} \right) = 8.34 \text{ mm}$$

$LR_{aplic} = 8.34$ mm en una hora con gasto medio del cuarto bajo.

La lámina de riego captada en los pluviómetros fue:

$LR_{cap} = 7.79$ mm.

Se calculó la lámina que se perdió por arrastre y evaporación:

$LR_{aye}/h = 0.55$ mm en una hora.

$$LRN = \frac{RR}{(1 - CV)} = \frac{5}{(1 - 0.14)} = 5.82 \text{ cm}$$

Las pérdidas por uniformidad de lluvia son: $P_{ull} = 5.82 - 5.0 = 0.82$ cm.

El sistema aplica 8.34 mm/h y llegan al cultivo 7.79 mm/h; entonces, para aplicar 5.82 cm, debe regar $5.82/0.779 = 7.47$ h.

Las pérdidas por arrastre y evaporación son: $P_{aye} = 0.055 * 7.47 = 0.4108$ cm.

$LR_{aye} = LRN + P_{aye} = 5.82 + 0.055 * 7.47 = 6.23$ cm.

$$EA_{aye} = \frac{5.82}{6.23} = 0.9342$$

Como $EA_{udh} = 0.972$ calculada en el estudio hidráulico,

$$LRA_{udh} = \frac{6.23}{0.972} = 6.41 \text{ cm.}$$

$$P_{udh} = LRA_{udh} - LRA_{aye} = 6.41 - 6.23 = 0.18 \text{ cm}$$

Como la eficiencia de conducción es = 0.98, entonces:

$$LRC = \frac{6.41}{0.98} = 6.54 \text{ cm}$$

$$P_{cond} = LRC - LRA_{udh} = 6.54 - 6.41 = 0.13 \text{ cm}$$

Como no hay estanque o reservorio para que se presenten pérdidas por evaporación, ya se puede calcular la eficiencia global:

$$EG = \frac{RR}{LB} = \frac{5}{6.54} = 0.765 \text{ o } 76.5 \%$$

Verificación por el método del requerimiento de riego y la suma de las pérdidas en el sistema:

$$LB = RR + Pull + Pevap + Pudh + Pcond + Palm$$

$$LB = 5.00 + 0.82 + 0.41 + 0.18 + 0.13 + 0 = 6.54 \text{ cm.}$$

Por lo anterior, se considera que el planteamiento propuesto de la lámina de riego bruta es correcto.

Cuadro 6.9. Procedimiento de cálculo del ejemplo en resumen.

CONCEPTO	FÓRMULA, DATO	VALOR PROYECTO	LÁMINA cm	PÉRDIDAS CM
Requerimiento de riego (cm)	DATO	5.000	5.000	
Coficiente de variación de prueba	DATO	0.141		
Lámina de riego neta (LRN)	$LRN=RR/(1-CV)$		5.823	
Pérdidas por uniformidad de lluvia (Pull)	$Pull=LRN-RR$			0.823
Eficiencia por evaporación y arrastre (Eeya)	DATO	0.934		
Lámina de riego ajustada por evaporación y arrastre (LRAeya)	$LRAeya=LRN/Eeya$		6.235	
Pérdidas por evaporación y arrastre (Peya)	$Peya=LRAeya-LRN$			0.412
Eficiencia de aplicación por uniformidad de distribución (Eaudh)	DATO	0.972		
Lámina de riego ajustada por uniformidad de distribución (LRAudh)	$LRAudh=LRAeya/Eaudh$		6.415	
Pérdidas por uniformidad de distribución (Pudh)	$Pudh=LRAudh-LRAeya$			0.180
Eficiencia de conducción (EC)	DATO	0.980		
Lámina de riego nivel conducción (LRC)	$LRC=LRAudh/EC$		6.545	
Pérdidas de conducción (PC)	$PC=LRC-LRAudh$			0.131
Eficiencia de almacenamiento (EALM)	DATO	1.000		
Lámina bruta (LB)	$LB=LRC/EALM$		6.545	
Pérdidas en almacenamiento (PALM)	$PALM=LB-LRC$			0.000
Suma pérdidas (SP)				1.545
Eficiencia global (EG)	$EG=RR/LB$		0.764	
Verificación	$LB=RR+SP$		6.545	

6.3. Evaluación económica

Con la finalidad de conocer si la inversión en un sistema de riego cumplió con las expectativas que tuvo el productor al comprarlo, sobre ahorros de agua, ahorros de energía e incrementos de producción y productividad, es necesario hacer un balance económico para obtener indicadores que permitan concluir sobre el mejoramiento obtenido.

La mayoría de los sistemas de riego se adquieren, instalan y operan para obtener beneficios al productor. Entonces, es necesario determinar todos los costos de un sistema de riego y las utilidades que genera. El costo total puede ser comparado con los beneficios recibidos o con el incremento en ingresos para determinar cuál es el beneficio obtenido y generado por el sistema.

El costo de adquisición del sistema de riego parcelario puede ser menor que la tercera parte del costo total del sistema, incluyendo costos de operación y conservación en su vida útil (cuadro 6.10, los años de depreciación son que se consideraron como años con vida útil del sistema). A continuación, se presenta una guía de cálculo de los costos de un sistema de riego.

Cuadro 6.10. Periodos estimados para depreciación de los componentes de un sistema de riego por aspersión.

Componente	Años de depreciación
Pozo	25
Bomba	15
Unidad de energía	
Diesel	15
LP	12
Gasolina, combustible de tractor	9
Gasolina del aire acondicionado	4
Electricidad	25
Motor de potencia	10
Estructuras de concreto	20
Tuberías de concreto	20
Medidores de madera	8
Tuberías para distribución de agua	40
Tuberías de acero revestidas enterradas	20
Tuberías de aluminio para aspersión	15
Cabezal de aspersión	8

El factor de recuperación del capital, como se utiliza aquí, combina la depreciación y el interés sobre las inversiones en un indicador numérico. Multiplicar el costo inicial del equipo por este indicador y calcular cuánto cuesta el equipo por año.

A continuación, se incluye la figura 6.10, que presenta la relación entre los años de vida útil de los componentes del sistema de riego, la tasa de interés compuesto en porcentaje y el factor de recuperación de capital.

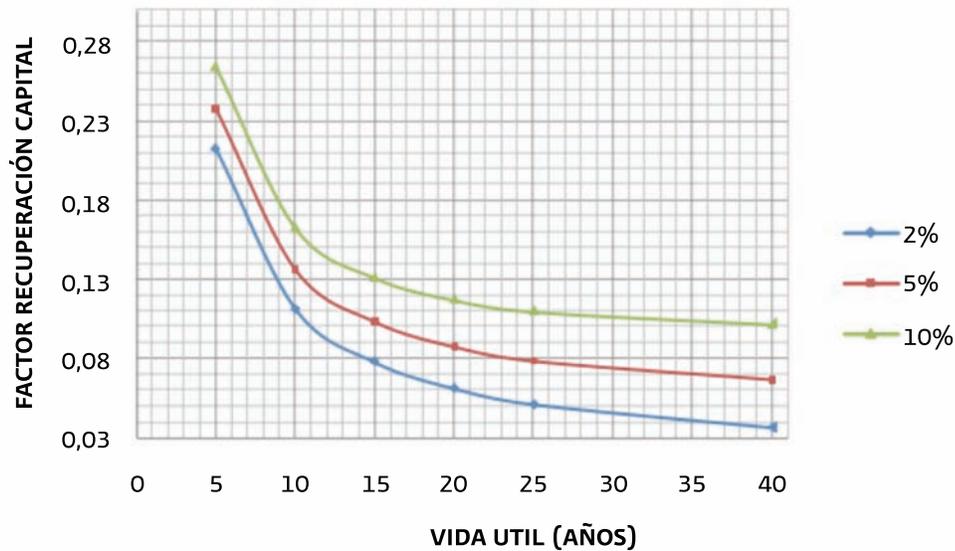


Figura 6. 10. Factor de recuperación de capital.

6.3.1. Costos del sistema de riego

Los costos siguientes deberían estimarse:

a) Costos fijos

Son todos los costos, incluyendo impuestos y seguros sobre el capital inicial o ampliado. Esto debería incluir los cargos e intereses de la depreciación anual sobre el capital invertido (cuadro 6.12).

b) Costo de obtener el agua para riego

Los derechos de riego en el sistema de distribución. Los cargos básicos por el agua por hectárea.

Costos de construcción sistema de bombeo. Costos de construcción del pozo, de la planta de bombeo, de estanques, de canales, etc. Cargos de subestación eléctrica.

Costo del sistema de distribución y aplicación del predio. Costos de la tubería de conducción y distribución, tuberías regantes, aspersores, equipos y accesorios. Costos de instalación.

Impuestos y seguros. Que se hayan pagado para el desarrollo del sistema de riego o su operación.

c) Costos anuales de operación y conservación

Son los correspondientes a: mano de obra necesaria para la distribución del agua (cuadro 6.11), costos de combustibles y energía eléctrica, cargos de mantenimiento de regaderas y nivelación de tierras.

Cuadro 6.11. Mano de obra estimada por hectárea de riego.

MANO DE OBRA ESTIMADA POR HECTÁREA POR RIEGO			
Tipo de movimiento	Rango en minutos	Promedio en minutos	Tiempo total por ha por riego minutos u horas
Movimiento manual:			
Movimiento	50-100	75	95 min o 1.58 h.
Retorno	15-25	20	
Sideroll (mecanizado)			
Movimiento	20-30	25	39 min o 0.65 h.
Retorno	10-15	12	
Enderezar	2	2	
Tractor y remolque final			
Movimiento	17-27	22	32 min o .533 h.
Retorno	7-12	10	

Ejemplo 5. Cálculo de costos de un sistema de riego por aspersión

Un campo de 16.187 ha cultivado con alfalfa, se riega con aspersión portátil manual. La fuente de suministro de agua es un estanque que está en el campo y no hay cargo por usar el agua. El sistema es diseñado para cubrir 16.187 ha en diez días y la época de riego consta de 220 días. Dieciocho riegos se aplican con volumen anual de 16,153.84 m³/ha por ciclo de cultivo. La mano de obra aprovechable es \$22.80 por hora. El sistema de riego se usa con dos movimientos por día. El sistema es cambiado de posición dos veces en 24 horas. El espaciamiento es 12.2 m por 18.28 m. El costo del sistema total instalado es de \$270,000.00, distribuidos como sigue:

Tubería principal de aluminio de 5 y 4 pulgadas de diámetro (\$115,200.00). Dos tuberías regantes de tres pulgadas (\$57,600.00). Con 33 aspersores (\$10,800.00). Planta de bombeo (\$86,400.00), bomba centrífuga eléctrica de 15 hp y 17.68 l/s a 42.7 m de carga dinámica total (CDT); se requieren 14 bhp caballos de potencia al freno.

Cuadro 6.12. Costos fijos.

COMPONENTE	COSTO PESOS	VIDA UTIL AÑOS	FACTOR DE RECUPERACIÓN DE CAPITAL		COSTO POR AÑO
Bomba	86,400.00	15	15 años al 5% =	0.0963	8,320.32
Tubería principal de aluminio	115,200.00	15	15 años al 5% =	0.0963	11,093.76
Regantes de aluminio	57,600.00	15	15 años al 5% =	0.0963	5,546.88
Aspersores	10,800.00	8	8 años al 5% =	0.1547	1,670.76
Total por año					26,631.72

Nota: impuestos y seguros deberían ser agregados a este costo anual.

Considerando 1.557 horas de mano de obra por hectárea, por riego necesarias para regar una ha y que la superficie total es 16.187 ha., el número de riegos es 18 y el costo de la mano de obra es de \$ 22.80 por hora (cuadro 6.13).

Cuadro 6.13. Costo por mano de obra.

COMPONENTE	HORAS POR HA	SUPERFICIE EN HA	NO. DE RIEGOS	TIEMPO EN HORAS	COSTO POR HORA PESOS	COSTO ANUAL
Mano de obra	1.557	16.187	18	453.66	22.80	10,343.38

Los costos de la energía se estiman con la información siguiente: para la potencia del motor al freno se utiliza el factor de conversión a kilowatts hora y el número de días de bombeo; considerando las 24 horas del día, se obtienen los kilowatts por ciclo y con el costo del kilowatt se obtiene el costo de la energía (cuadro 6.14).

Cuadro 6.14. Costos de energía.

COMPONENTE	BHP	BHP*KW	KW*H	DIAS	HORAS POR CICLO	KW*CICLO	COSTO POR KW	COSTO DE ENERGÍA \$
Potencia	14	0.93	13.02	220	5280	68,745.60	0.12	8,249.47

Ahora, considerando todos los costos, se tiene que la suma es \$35,177.54 y que el costo por ha es de \$ 2,173.14 (cuadro 6.15).

Cuadro 6.15. Costos totales.

CONCEPTO	COSTO EN PESOS
Costos fijos totales	26,631.72
Costos de mano de obra	10,343.38
Costos de energía	8,249.47
Costo total	45,224.57
Costo por ha	2,793.88

6.3.2. Costos del cultivo, valor de la cosecha y relación beneficio-costos

Para calcular los costos del cultivo es necesario incluir las actividades y costos que se generan por producir el cultivo, como son: preparación del terreno, siembra o plantación, fertilización, riego, aplicación de agroquímicos, cosecha, asesoría técnica, renta de la tierra, cuota por servicio de riego, seguro agrícola y los que apliquen. En el cuadro 6.16 se presentan los costos considerados en el ejemplo.

Cuadro 6.16. Costo por actividad.

ACTIVIDAD	COSTO
1.- Preparación del terreno	1,628.39
2.- Siembra y/o plantación	3,158.46
3.- Fertilización	2,001.12
6.- Riego	2,793.88
9.- Cosecha	5,131.07
Costo total	14,712.92

En el cuadro 6.17 se incluyen los ingresos por venta de la producción (valor de la cosecha), gastos por el costo de producción, utilidades, relación beneficio-costos, productividad de la tierra, productividad del agua en relación al producto y a sus ingresos por venta de la producción.

Cuadro 6.17. Valor de la cosecha, costo de producción, utilidad, relación beneficio-costos e indicadores.

CONCEPTO	INDICADORES
Cultivo	Alfalfa
Ingresos por venta de producción (\$)	679,560.00
Costo de producción (\$)	238,158.04
Utilidad (\$)	441,401.96
Productividad de la tierra en producto (t/ha)	21.00
Productividad de la tierra en pesos (\$/ha)	42,000.00
Producción del agua (kg/m ³)	1.30
Productividad del agua (\$/m ³)	2.60
Relación beneficio-costos (RBC)	2.85

6.4. Procedimiento para evaluar un sistema de riego

A continuación, se presentan las acciones recomendadas para desarrollar evaluaciones de sistemas de riego.

1. Inspección visual del sistema de riego y del cultivo, mediciones básicas de operación y pruebas de uniformidad hidráulica y de aplicación del agua.
2. Hacer una estimación de la eficiencia del sistema por ciclo de cultivo o por riego.
3. Evaluación del equipo de bombeo y costos de energía.

Estas acciones involucran evaluar el sistema o sus prácticas de manejo en su forma usual de operar. Los resultados del análisis y reporte técnico de la evaluación, deben compararse con parámetros estándar para hacer las recomendaciones pertinentes.

Para evaluar un sistema de riego es necesario cumplir los siguientes requisitos:

- El evaluador debe conocer el criterio del agricultor para determinar cuánto y cuándo regar.
- El sistema de riego debe operar en las condiciones normales de funcionamiento.
- El evaluador debe elaborar y realizar un plan de evaluación del sistema.

6.4.1. Proceso de evaluación

Para realizar con calidad las evaluaciones de los sistemas de riego, se presentan a continuación las fases del proceso.

- Decisión de realizar la evaluación del sistema de riego.
- Definición de objetivos o de que aspectos se estudiarán.
- Concertación con un evaluador.
- Obtención de la información básica.
- Análisis de documentos e información.
- Proyecto de trabajos de campo.
- Mediciones de campo y resultados.
- Análisis del sistema.
- Elaboración del reporte.
- Elaboración de decisiones.
- Cambios en el sistema, operación y conservación.

6.4.2. Planeación de una evaluación

El proceso de evaluación se basará en la preparación previa y bien hecha del plan de trabajo, elaborado para la visita de campo.

Deben decidirse los objetivos de la evaluación y el nivel de información requerido, porque están relacionados con el equipo y los materiales necesarios para desarrollar el trabajo y obviamente con sus costos y de debe considerarse que puede evaluarse desde los enfoques agronómico, hidráulico y económico.

Esta preparación debe tomar en cuenta toda la información que se puede obtener del sistema de riego instalado, como son los datos generales de ubicación, caminos de acceso, expediente del proyecto del sistema de riego, con memoria de cálculo, memoria descriptiva, planos de construcción y guía de operación del sistema.

6.4.3. Requerimientos generales para conocer el grado de desempeño

1) Capacidad del sistema. La cantidad de agua aplicada en cada riego debe satisfacer las necesidades del cultivo; esto garantiza que se suministre el agua en la cantidad requerida y con la oportunidad necesaria en todo su ciclo.

2) Lámina aplicada. La cantidad de agua aplicada durante un riego, no debería ser más grande que la lámina requerida para: almacenamiento en el punto de menor capacidad de retención del suelo, control de sales en el suelo y lámina correspondiente a las pérdidas por evaporación y arrastre por viento.

Todos los emisores de un sistema de riego, como mínimo, deben aplicar el volumen de agua necesario para generar la lámina de riego requerida en el punto de mínima retención de humedad del campo. Esto es muy importante porque, en muchos casos, se toma como emisor de control el que aporta el gasto medio de la tubería regante. En este caso, unos aspersores aplican volúmenes mayores que los necesarios y otros volúmenes menores.

3) Lámina precipitada horaria o intensidad de aplicación. El agua no debería ser aplicada más rápido que la velocidad de absorción. Sin embargo, debería aplicarse con el tamaño de gota y la intensidad suficiente para reducir las pérdidas por evaporación y arrastre por el viento. No debe haber encharcamientos o escurrimientos superficiales.

4) Uniformidad de aplicación. Debe analizarse la uniformidad de aplicación del agua en las secciones de riego en todo el campo y si no es posible, seleccionar una sección representativa. Se debe considerar una diferencia de descarga máxima permisible entre aspersores y, por lo tanto, la diferencia de presiones de operación correspondiente.

5) Pérdidas de agua. La mayor parte de las pérdidas de agua en un sistema de riego por aspersión bien diseñado y operado, se presentan por la evaporación y por el arrastre del agua por el viento. Esto sucede entre la boquilla del aspersor y el follaje del cultivo. Las pérdidas no deberían ser mayores del 15% del flujo del sistema.

6) Volumen bruto de agua. El volumen total utilizado con el sistema de riego debe incluir las pérdidas en el almacenamiento y en la conducción, las pérdidas por falta de uniformidad de distribución hidráulica, las pérdidas por arrastre y evaporación, las pérdidas por falta de uniformidad de lluvia y la lámina de control de salinidad.

7) Daños al cultivo. El agua debería ser aplicada de manera que no cause daños al cultivo o produzca efectos negativos en el suelo superficial. Puede tirar flores de las plantas o puede compactar suelo y formar costra.

8) Tamaños adecuados de tubos. La distribución de los tamaños de los tubos debería ser tal que haya un balance económico entre el costo de los tubos y el costo de la energía.

9) Estado físico de los componentes. El estado físico de los componentes del sistema de riego y su mantenimiento o conservación deben ser adecuados. Esto incluye el equipo de bombeo, los dispositivos de control, accesorios, las tuberías y sus conexiones.

10) Diagnóstico. Diagnosticar el funcionamiento del sistema de riego. Definir los aciertos o los problemas existentes de diseño, instalación, operación y conservación, para proponer las soluciones técnicas más sencillas y económicas de mejora.

6.4.4. Objetivos y requisitos generales

Objetivos. Se realizan las evaluaciones de los sistemas de riego cuando se requiere:

- Apoyar técnicamente el proceso de entrega-recepción de un sistema adquirido e instalado.
- Conocer si el sistema funciona bien al inicio de los ciclos de cultivo.
- Saber si el personal que opera el sistema de riego está bien capacitado para su manejo y conservación.
- Definir cómo operar un sistema de riego que no tiene información de proyecto o instructivo de operación y conservación.
- Elaborar proyecto de mejora del sistema de riego en infraestructura o en operación y conservación.

6.4.5. Evaluación de campo

- Hacer el plan de muestreo, establecer objetivos, resultados esperados y definir los materiales necesarios.
- Realizar la inspección visual y hacer un inventario de las partes sistema de riego por aspersión, con revisión de su estado físico.
- Verificar en campo las características de operación del sistema de riego.
- Determinar la cantidad de agua por reponer en el riego en la zona radical.

- Medir presiones y gastos en los puntos clave del sistema de riego para obtener la eficiencia de riego, y la uniformidad hidráulica del sistema de riego global y por secciones.
- Determinar la uniformidad de la lluvia y la uniformidad de distribución hidráulica del sistema de riego y considerar la importancia de los efectos de orilla.
- Estimar las pérdidas por evaporación y arrastre del viento.
- Calcular la eficiencia de aplicación del sistema de riego.
- Evaluar el manejo del sistema de riego.
- Hacer las recomendaciones para mejorar el sistema de riego, su operación y mantenimiento.

6.4.6. Dispositivos y materiales para la evaluación

Lo ideal es contar con un laboratorio móvil que incluya equipo de trabajo que permita:

- Registrar la información y procesarla con *software*.
- Ubicar el lugar con GPS y hacer croquis de la parcela o parcelas evaluadas.
- Análisis de suelos sobre fertilidad y salinidad.
- Aforos de gasto con medidores portátiles calibrados y aforos con el método de volumen y tiempo.
- Mediciones de láminas de agua precipitadas.
- Mediciones de presión en tomas fijas o con accesorios para adecuaciones.
- Mediciones de velocidades de viento, humedad relativa y temperatura.
- Mediciones de distancias.
- Tomar fotografías.

Es conveniente contar con los materiales e información siguiente:

- Información general del predio: dueño y contacto, mapa o croquis de localización y domicilio. Fotos aéreas y plano de contorno. Mapa de caminos de acceso.
- Información de clima: evapotranspiración del cultivo o datos para calcularla, datos de lluvia. Los datos deben ser correspondientes al periodo incluido en la evaluación del sistema de riego.
- Información de suelos: textura, características de retención de humedad, y salinidad.
- Profundidad de manto freático.
- Datos de la fuente de abastecimiento: tipo de fuente y calidad del agua, volumen concesionado o disponible para riego, ubicación en campo, gasto total y presión de operación. Sistema de prevención de obstrucciones en aspersores.

- Información del sistema de riego: distribución en campo del sistema de riego, planta de bombeo, tuberías e hidrantes y movimientos de las tuberías regantes. Edad del sistema y mantenimiento o mejoras. Guía de operación. Tipo de aspersor e información técnica.
- Información del cultivo: tipo, variedad, fechas de siembra y cosecha, y etapas de desarrollo fenológico.
- Información del manejo del sistema de riego: datos de monitoreo, intervalos y tiempos de riego. Profundidad de humedecimiento del suelo y láminas de riego programadas.
- Computadora portátil o formatos para captura de información y libreta de campo.
- Lapicero y goma.
- Teléfono celular y cámara.
- GPS (para obtener coordenadas geográficas y altitud sobre el nivel del mar).
- Medidor de gasto portátil.
- Anemómetro, termómetro y medidor de humedad.
- Pluviómetros o botes para captar la lluvia generada por el aspersor, con el bordo delgado, sin deformaciones y con altura mínima de 15 cm.
- Probetas graduadas de 500 ml y un litro con graduaciones del orden de 2 a 10 ml por marca.
- Cronómetro.
- Manguera flexible de 2.5 cm de diámetro interior y 3 m de longitud.
- Recipientes de plástico graduados, de 5, de 20 y 50 litros.
- Barrena para suelos, bolsas de plástico, cinta para amarrar.
- Botas de hule, impermeable, guantes, toalla y cambio de ropa.
- Caja de herramientas (desarmador, pinzas, martillo, navaja, llaves Stillson y perica).
- Cintas métricas (metálica de 5 m; plástico de 50 m).
- Manómetros (0 a 250 kPa, 0 a 400 kPa, 0 a 1000 kPa).
- Tubo de Pitot, manguera flexible para conectar manómetros.

6.4.7. Organización de la visita

Es conveniente coordinarse con la persona encargada de proporcionar los requerimientos de información y que el operador tenga instrucciones de participar en la evaluación para que se involucre en el proyecto de mejora continua. Deben acordarse los puntos siguientes:

Fecha de la evaluación, hora y lugar del encuentro con la persona encargada de proporcionar los requerimientos de información y el operador.

Confirmar el tipo y nivel de la evaluación, resultados esperados y cuánto se debe pagar por el servicio.

Asegurar que el sistema estará operando para su evaluación; esto implica que esté disponible en tiempo y en procedimientos.

6.4.8. Realizando una evaluación

Lo ideal es que el dueño esté presente durante la evaluación para asegurar que el equipo esté operando correctamente o como funciona normalmente. El dueño debe aceptar hacer instalaciones de medición de gasto y presión si se requieren. Asimismo, tener el personal que opera y mueve las partes del sistema de riego.

Lo siguiente puede ser de ayuda:

- Por razones de protección personal, se requiere que se tomen las precauciones necesarias si el agua contiene algún tratamiento químico.
- Hacer una inspección antes de la prueba. Observar el desarrollo del cultivo y registrar anomalías, sobre todo si se observan efectos de mala distribución de la lluvia. Evaluar las condiciones del suelo respecto a humedad, retención de humedad y profundidad de crecimiento de las raíces. Ubicar los puntos de control y las posiciones de las tuberías regantes. Medir y registrar variaciones topográficas que influyan en el funcionamiento hidráulico de las tuberías regantes, principalmente en puntos clave del sistema.
- Cuando no se tiene un plano del sistema de riego en estudio. Es necesario preparar un plano o un croquis con el cabezal de control, la tubería principal, tomas o hidrantes, la tubería de conducción, distribuidores y regantes. Señalar la ubicación de reguladores de presión, válvulas de lavado y las posiciones donde se realizará o realizarán las pruebas.
- Poner a funcionar el equipo de medición. Verificar medidores de flujo y presión portátiles o fijos. Instalar los manómetros que se requieran en los puntos claves. Ubicar puntos para colectores de precipitación utilizados para determinación de la evaporación en ellos. En caso de sistemas de movimiento continuo, poner marcas para determinar la velocidad. Establecer el sitio para determinación del estado del tiempo (anemómetro, higrómetro y termómetro).
- Entrenamiento. Practicar la toma de lecturas de los medidores de energía y flujo de agua, de manómetros. Verificar las condiciones de prevención de taponamiento de aspersores y que los aspersores estén en posición correcta.
- Verificación de la operación del sistema de riego. El operador debe iniciar el funcionamiento del sistema y se deben medir y registrar los gastos y las presiones de operación del cabezal de control. Verificar que el equipo esté funcionando correctamente. Registrar las presiones en puntos de control. Evaluar encharcamientos y escurrimientos. Evaluar fugas y aplicación de riego no programado. En caso necesario, medir la velocidad del equipo de riego.
- Verificación de aspersores. Que sean del mismo modelo. Revisar que no haya aspersores tapados o movidos o cualquier anomalía de la lluvia de la aspersión. Medir el gasto y el radio de mojado del aspersor en los sitios específicos programados.
- En las pruebas de uniformidad, registrar las condiciones de velocidad y dirección del viento, humedad y temperatura. Hacer medidas durante la prueba.
- Poner el agua en los colectores de sitios seleccionados para medir la evaporación, con la lámina correspondiente a la prueba, y medir la lámina evaporada durante

la prueba registrando volumen y tiempo. Cuando los colectores dejen de recibir lluvia, deben medirse los volúmenes captados, registrando cada dato.

- Al terminar de medir los colectores, se deben medir los utilizados para la evaporación. Volumen y tiempo.
- Para cañones viajeros, pivotes y avances frontales pueden requerirse pruebas específicas del movimiento de los equipos de riego.

6.4.9. Analizando datos de una evaluación

Para el procesamiento y análisis de datos de evaluaciones de riego, se recomienda preparar *software* específico para facilitar el registro y los cálculos necesarios.

Determinar el desempeño o funcionamiento del sistema de riego. Procesar los datos obtenidos para calcular los indicadores claves de desempeño del sistema evaluado en sus condiciones de operación. Comparar los resultados con valores de proyecto o reportados de buen funcionamiento. Identificar las causas de fallas en el funcionamiento y evaluar su contribución a la operación global. Relacionar causas con efectos para determinar acciones de mejora.

Determinar la eficiencia global del ciclo anterior. Procesar la información obtenida del ciclo anterior para evaluar las condiciones de los riegos del ciclo anterior. Calcular los ahorros en dinero, que pueden hacerse al operar correctamente y también mejorando el sistema de riego. Estimar las pérdidas intrínsecas al sistema y las generadas por no manejar correctamente el sistema de riego.

6.4.10. Preparando el reporte de una evaluación

La finalidad del reporte técnico es facilitar al propietario mejorar su sistema de riego y su operación para que ahorre agua, energía y produzca cosechas de altos rendimientos y de buena calidad. Para esto debe incluir lo siguiente:

- Presentar los indicadores de desempeño con conclusiones de los resultados y comparaciones con datos de referencia.
- Presentar las recomendaciones de mejoramiento físico o estructural y de operación y mantenimiento.
- Presentar recomendaciones de cuándo y cuánto regar para alta productividad.
- Incluir en el informe la memoria descriptiva de la evaluación con fotografías, la memoria de cálculo o reportes del programa de cómputo utilizado, conclusiones y recomendaciones. Adjuntar la base de datos.
- Incluir un resumen práctico de acciones de mejora estructurales, con las inversiones necesarias para el mejoramiento del sistema, y las no estructurales, con las conclusiones y recomendaciones de operación y mantenimiento para su mejoramiento general.

6.5. Recomendaciones para el mejoramiento de sistemas de riego por aspersión

Un sistema de riego por aspersión puede usarse bien si se conocen sus bases de operación, sobre cuánto, cuándo y cómo regar. Además, es necesario conocer los indicadores de desempeño del sistema de riego para saber qué ajustes son los necesarios para su mejoramiento.

6.5.1. Bases de operación de un sistema de riego por aspersión

Para operar bien un sistema de riego por aspersión, es necesario conocer cuatro aspectos básicos:

Primero. Cuánta agua se debe aplicar a un cultivo en cada riego para satisfacer sus necesidades hídricas, la lámina de control de sales, la lámina de exceso para compensar la falta de uniformidad de lluvia, la lámina para compensar el arrastre y la evaporación durante el riego, la lámina para en exceso que se aplica por falta de uniformidad de distribución hidráulica, la lámina para compensar las pérdidas por conducción y en el almacenamiento (deben aplicarse las láminas de acuerdo con las partes que integren el sistema de riego). Además, tomar en cuenta los requerimientos de sustentabilidad de la producción agrícola, con un sistema de riego por aspersión.

Segundo. Cuánta agua aplica un sistema de riego por aspersión en una hora, expresada en lámina asperjada por hora. Esto se refiere a la capacidad de aplicación de agua en las tuberías regantes o en las secciones de riego.

Tercero. Cuánta agua llega al suelo o al cultivo de la que se emite por el aspersor en una hora, dada en lámina precipitada horaria.

Cuarto. Con la lámina precipitada por hora que llega al cultivo o al suelo, se debe calcular el tiempo de operación de una tubería regante, de una sección de riego o del sistema de riego, de acuerdo con el número de regantes, de secciones de riego o del sistema de riego por aspersión, para satisfacer las necesidades del cultivo expresadas en lámina de riego.

6.5.2. Indicadores de desempeño y acciones de mejora de un sistema de riego por aspersión

El mejoramiento de los sistemas de riego por aspersión debe basarse en la evaluación previa a las acciones de mejora. De acuerdo con los resultados de la evaluación, deben realizarse las acciones de mejora. Para orientar sobre las acciones, se preparó el cuadro 6.18, sobre indicadores de desempeño de los sistemas de riego por aspersión y las acciones de mejora.

Cuadro 6.18. Cuadro de indicadores de desempeño y recomendaciones para mejoramiento.

INDICADOR DE DESEMPEÑO	VALORES MÍNIMOS %	RECOMENDACIONES PARA MEJORAR
Coeficiente de uniformidad estadístico o eficiencia estadística.	80	Aumentar el traslape entre aspersores y entre tuberías regantes. Cambiar boquillas para incrementar el traslape y ajustar la presión igualando el gasto.
Eficiencia de aplicación por arrastre y evaporación.	85	Reducir la presión del aspersor para aumentar el tamaño de gota, sin afectar el traslape o cambiar boquillas para aumentar el traslape.
Uniformidad de distribución hidráulica o eficiencia de distribución hidráulica.	95	Aumentar el diámetro de la tubería regante o disminuir el número de aspersores para reducir diferencias de presión en los aspersores. Cambio de posición de tuberías en campo para reducir las diferencias de presión en los aspersores o cambiar boquillas.
Eficiencia de conducción.	98	Cambiar empaques de tuberías y válvulas, cambiar tuberías o piezas dañadas.
Eficiencia de almacenamiento.	Variable	Utilizar poliestireno o material flotante en estanques (donde no se produzcan peces), para evitar la evaporación y revestimiento o impermeabilización del fondo.
Eficiencia de riego global.	Variable	Jerarquizar los factores que influyen en la baja eficiencia global y atender los que repercutan en ahorros mayores de volúmenes de agua. Regar sin usar embalse para almacenar el agua.
Productividad del agua	Variable	Utilizar el indicador de productividad del agua en relación a pesos de producto por unidad de volumen utilizado, para dar prioridad a lo económico.
Encharcamientos o escurrimientos	No se aceptan	Reducir la intensidad de precipitación o la lámina precipitada horaria, cambiando aspersores o boquillas

6.5.3. Recomendaciones generales de operación de un sistema de riego por aspersión

Control en el cabezal principal. Con el manómetro o medidor de flujo, se debe verificar la presión o el gasto de operación del sistema de riego por aspersión, que debe estar definido en la guía de operación para el administrador del sistema de riego, en la memoria de cálculo o en los planos del proyecto. También, en la guía debe incluirse el procedimiento de operación por secciones de riego o por hidrantes.

Control en los hidrantes. Los hidrantes en riego por aspersión son válvulas que sirven para regular la presión de entrada a la tubería regante y, por lo tanto, el gasto de la misma. *Es muy importante que cada vez que se ponga a funcionar una tubería regante, con el hidrante se fije la presión de operación en la tubería, de manera que el riego pueda controlarse, porque si se tiene el gasto adecuado en la tubería regante, entonces el volumen aplicado sólo depende del tiempo de aplicación.* Cabe hacer notar que pocos productores están enterados de que pueden controlar mejor sus láminas de riego y su eficiencia de aplicación siguiendo esta recomendación. Esto debería quedar evidente en evaluaciones de los sistemas de riego por aspersión.

Traslape de lluvia entre aspersores. Es necesario que en toda la zona de riego por aspersión se presenten traslapes, si es posible del 50% del diámetro de cobertura del aspersor para contrarrestar cualquier efecto de viento. Los traslapes de lluvia mayores al 50% del diámetro de mojado de los aspersores, deben usarse en zonas con vientos que puedan distorsionar el patrón de mojado. En las orillas de la parcela debería usarse aspersores de 180 grados de ángulo de mojado, para evitar regar fuera del terreno cultivado.

Intensidad de precipitación. Se considera la intensidad de precipitación como la lámina precipitada horaria que aplica el sistema o la tubería regante, teniendo en cuenta cuando el riego esta traslapado. Al regar con riego por aspersión, el agua debe penetrar en el suelo sin saturar su capa superficial; esto implica que la intensidad de precipitación sea menor que la capacidad de absorción de agua del suelo húmedo, o menor que la velocidad de infiltración básica del agua en el suelo. Al saturarse la capa superficial del suelo, el agua puede escurrir a otro sitio no proyectado, o encharcar y aumentar la infiltración con posibilidad de perderla por percolación. Saturar el suelo generalmente implica reducir la productividad del cultivo, dependiendo del tiempo con condición de saturación.

Lámina de riego deficitaria. Es importante aclarar que no debe aceptarse que se proyecte aplicar láminas de riego que originen déficit de lámina en alguna parte de la parcela. Esto se debe a que hay técnicos que aplican la lámina media de los aspersores como la lámina neta y, por lo tanto, aplican una lámina que compensa los déficits en la mayoría de los aspersores, con los excesos que aplica una minoría de los mismos. Esto tiene como efectos la reducción de rendimientos o la aplicación excesiva del volumen de agua.

Uso de la lámina media de la tubería regante. Hay que recordar que no debe calcularse el tiempo de riego con la lámina media que aplica la tubería, porque la mayoría de los aspersores aplicaría menos agua que la media y el riego sería deficiente. Debe garantizarse que la lámina aplicada corresponda, al menos, a la media del cuarto bajo de los aspersores de la tubería regante, y debe tomarse en cuenta la lámina que reciben efectivamente el suelo o el cultivo para que se cumpla el riego, de acuerdo con el proyecto. Debe usarse para el cálculo de la eficiencia de distribución hidráulica.

Regando con aguas salinas. La absorción de iones tóxicos y sus efectos en las plantas, ocurren regando durante periodos de tiempo con humedad relativa menor de 35%, con altas

temperaturas y presencia de viento. Los cultivos sensibles al cloro y al sodio son los que se pueden afectar más fácilmente. Para reducir los efectos de toxicidad en las hojas por la aspersión, se recomienda regar de noche y evitar el riego durante la presencia de vientos secos y cálidos. Además, los cambios de posición de tuberías con aspersores deben hacerse en la dirección más apegada a la del viento, para que lave las hojas mojadas por transporte de gotas de la posición anterior; usar aspersores de giro rápido; aplicar intensidades altas de lluvia, sin encharcar, y riego con gotas grandes, sin que originen problemas de escurrimiento por compactación del suelo.

Riegos para siembra. Para desarrollar cultivos, se puede sembrar en suelo seco y suelo húmedo con riego por aspersión. En los dos casos, se tiene que regar el suelo sin cubierta vegetal, por lo que debe tenerse cuidado de no compactar la capa superficial para evitar formación de costras o arrastre de suelo. El tamaño de gota no debe ser grande o generado por baja presión de operación del aspersor; para evitar que se compacte el suelo, utilizar el aspersor dentro del rango alto de presiones de operación.

Riegos contra acción de heladas. Se puede utilizar el sistema de riego con altas presiones para atomizar el agua y generar pequeñas gotas de agua que floten y permitan que se enfríe el agua, en lugar de las células de las plantas. Si las hojas se mojan, para que se congele el agua de las células, primero debe congelarse el agua del exterior y si la helada no es tan fuerte, ese hecho protege al cultivo. Esto implica que el equipo de bombeo tenga capacidad suficiente y se tengan materiales como tuberías y aspersores, para dominar la mayor parte del campo. Procurar regar en la zona de entrada del aire frío, para reducir su efecto sobre el cultivo.

Cálculo de la lámina bruta de un riego. Se debe integrar la lámina de riego que evite tener deficiencias de agua en el área cultivada, considerando las láminas para cubrir el requerimiento de riego, los déficits que se generan por la falta de uniformidad de lluvia, las pérdidas por arrastre y evaporación, y el exceso necesario por la falta de uniformidad hidráulica del suministro de agua por los aspersores y las láminas para compensar las pérdidas en la conducción y en el almacenamiento. Obviamente, se usan las que deben aplicarse según sea el caso. Esto parece que la lámina necesaria es muy grande, sin embargo, las pérdidas generalmente son muy pequeñas y deben cuantificarse por separado, para poder mejorar cada componente de las pérdidas o de las eficiencias.

7.1. Ejemplo de evaluación agronómica en riego por aspersión tipo pivote

En el valle de Culiacán se realizó una evaluación agronómica de un sistema de riego por aspersión de pivote central con cultivo de caña. La superficie del lote es de 50 ha, la lámina de riego total aplicada a nivel de parcela fue de 1,080 m. y se obtuvieron 7,240 toneladas.

El suministro de agua es de un pozo con un equipo de bombeo de turbina vertical, y se conduce con una regadera excavada en tierra hasta la entrada de la parcela, donde se tiene el cárcamo de bombeo para abastecer al equipo de riego de pivote central.

Textura del suelo: limo arenoso.

Conductividad eléctrica del extracto a saturación: 3 dS/m (suelo normal).

Conductividad eléctrica del agua de riego: 0.4 dS/m (buena, sin restricciones de uso).

El manto freático se encuentra a una profundidad de variable.

Se extrajeron para riego 887 millares de m³ del pozo.

No se observaron escurrimientos superficiales ni encharcamientos durante el riego.

Se quiere saber:

¿Cuál fue el rendimiento de la caña o la productividad del suelo?

¿Cuál fue la productividad del agua?

¿Cuál fue la eficiencia de riego?

¿Cuál fue la eficiencia de conducción?

¿Cuál fue el volumen de las pérdidas de agua?

7.1.1. Información obtenida sobre el cultivo de caña

Se revisó la información existente sobre caña. A continuación se presenta la información obtenida:

Periodo vegetativo: Perenne-soca: 365 días.

Necesidades de temperatura: 22-30 °C, rango de oscilación: 15-35 °C.

Necesidades de horas luz para floración: indiferente.

Limitaciones: Sensible a heladas; durante la maduración necesita clima medianamente frío (10-20 °C); además, seco y soleado.

Necesidades de suelos: profundos, bien aireados, pH de 5-8.5, óptimo de 6.5.

Tolerancia a la salinidad: moderadamente sensible.

Profundidad del manto freático: 1.5 a 2.5 m.

Necesidades de fertilizantes por ciclo: 100-200 N; 20-90 P y 125-160 K.

Necesidades de agua por periodo vegetativo: 1,500-2,000 mm.

Sensibilidad al suministro de agua: alta.

Rendimiento (bajo riego): 110-150 t/ha. Sin problemas, cultivo sano y sin déficit de agua.

Eficiencia de utilización del agua para el rendimiento cosechado: 5-8 kg/m³ (80% de humedad) y de 0.6-1.0 kg/m³ en azúcar, con 0% de humedad.

7.1.2. Productividad del suelo y del agua en el cultivo de caña

¿Cuál fue el rendimiento de la caña o productividad del suelo?

El rendimiento del cultivo (RC) fue:

$$RC = \frac{8240}{50} = 144.8 \text{ ton/ha}$$

De acuerdo con la información general, el rendimiento fue muy bueno.

¿Cuál fue la productividad del agua?

El volumen de agua usada a nivel parcelario fue:

$$VA = \frac{1.080 * 50 * 10000}{1000} = 540 \text{ Mm}^3$$

El volumen bruto fue 887 millares de m³, necesario para hacer llegar 540 millares de m³ a la parcela.

La productividad del agua bombeada en el lote de aspersión fue estimada de la manera siguiente:

$$PA = \frac{RC}{VAB} = \frac{7240}{887} = 8.16 \text{ ton/Mm}^3 = \frac{8.16 * 1000}{1000} = 8.16 \text{ k/m}^3$$

Con ese resultado, se considera muy buena la productividad del agua de riego o del sistema de riego; sin embargo, es necesario tomar en cuenta las aportaciones de manto freático y de la lluvia para conocer el volumen aprovechado por el cultivo y la verdadera productividad del agua de riego.

Para el análisis del problema fue necesario hacer ajustes al requerimiento de riego por lluvia efectiva, por salinidad y por aportaciones de manto freático.

7.1.3. Cálculo de la evapotranspiración de referencia de la zona

Primero, se obtuvieron los datos meteorológicos de una estación instalada en la zona y fueron los siguientes: temperatura media diaria, humedad relativa, velocidad del viento, horas de insolación y radiación solar, y con el programa *CROPWAT* de la FAO, se calculó la evapotranspiración de referencia diaria (ver cuadro 7.1).

Cuadro 7.1. Parámetros meteorológicos necesarios para calcular la evapotranspiración de referencia.

MES	TEMP. MED. (°C)	HUMEDAD (%)	VIENTO (m/s)	INSOLACIÓN (horas)	RAD (MJ/m ² (día))	Eto (mm/día)
Ene.	18.5	55	2	8	15.2	3.06
Feb.	18.9	55	2	8	17.2	3.45
Mar.	20.3	50	2	9	20.9	4.32
Abr.	22.7	46	1	10	24.2	4.57
Mayo.	25.0	42	1	11	26.5	5.24
Jun.	28.2	36	1	12	28.0	5.91
Jul.	28.9	34	1	12	27.9	6.02
Ago.	28.4	35	1	11	25.9	5.6
Sep.	28.1	36	2	10	22.9	4.98
Oct.	26.5	42	2	9	19.1	5.08
Nov.	22.6	46	2	8	15.5	3.91
Dic.	19.8	50		8	15.4	3.24
Total	24.0	44	1.5	9.7	21.5	4.62

Para elaborar el requerimiento y el programa de riego se utilizó la información del cultivo y del suelo, que se presenta a continuación:

Para introducir la información al programa *CROPWAT* se hicieron las consideraciones siguientes: como el cultivo fue caña, se tomó el ciclo de cultivo de los perennes (365 días); para adecuar las etapas de desarrollo se tomaron, en la etapa inicial, treinta días; en la etapa de desarrollo, sesenta días; en la etapa de mediados, 180 días y, para la etapa final, 95 días.

La profundidad radical se consideró de 90 cm, durante todo el ciclo, por ser cultivo perenne.

La humedad fácilmente aprovechable considerada para determinar las láminas de riego fue de 0.65; esto implica que se consume el 65% del agua y es fácilmente aprovechable, de acuerdo con la textura del suelo.

El suelo identificado en las parcelas fue limo arenoso, con las características siguientes: humedad aprovechable total, 90 mm/m; espesor de suelo explorado y explotado por las raíces, 90 cm, y el contenido de humedad aprovechable inicial en el momento de empezar el programa de riego, 0 por ciento.

7.1.4. Requerimiento de riego, tomando en cuenta la evapotranspiración del cultivo y la lluvia efectiva

Por otra parte, se utilizó la precipitación pluvial mensual para calcular la lluvia efectiva, como se puede ver en el cuadro 7.2.

Cuadro 7.2. Precipitación pluvial mensual y la lluvia efectiva o aprovechable.

MES	PRECIPITACIÓN (mm)	LLUVIA EFECTIVA (mm)
Ene.	16.7	13.4
Feb.	9.9	7.9
Mar.	3.1	2.5
Abr.	2.5	2.0
Mayo.	1.9	1.5
Jun.	23.5	18.8
Jul.	154.0	123.2
Ago.	210.4	168.3
Sep.	120.6	96.5
Oct.	54.4	43.5
Nov.	28.7	23.0
Dic.	27.7	22.2
Total	653.4	522.7

La evapotranspiración del cultivo calculada con los datos climatológicos fue 1,493.5 mm, y la precipitación efectiva de 522.7 mm, por lo que el requerimiento calculado con el método del programa FAO fue de 970.8 milímetros.

7.1.5. Requerimiento de riego tomando en cuenta la salinidad

Para tomar en cuenta la calidad del agua y el criterio de salinidad, es necesario calcular el exceso de agua de riego necesario para mantener un contenido adecuado de sales en el suelo con la finalidad de evitar la reducción de la producción del cultivo por los efectos de salinidad. Este exceso debe agregarse al requerimiento de riego.

Con el objetivo de determinar la lámina de sobrerriego para control de la salinidad, se requiere conocer la calidad del agua de riego y el contenido de sales solubles. Con ello se definen las condiciones en las que se puede trabajar con buena productividad. Por lo tanto, deben calcularse el factor de lavado y la lámina de sobrerriego, que deben adicionarse al requerimiento de riego.

En la bibliografía se encontró una relación entre la productividad de un cultivo y la salinidad en el extracto de la solución del suelo, que se representó con la ecuación siguiente:

$$PC_s = 100 - b * (CE_{es} - a)$$

Para el caso de la caña, se tiene que:

$$a = 1.7 \text{ dS/m}$$

b = 5.75, por lo que:

$$PC_s = 100 - 5.75 * (CE_{es} - 1.7)$$

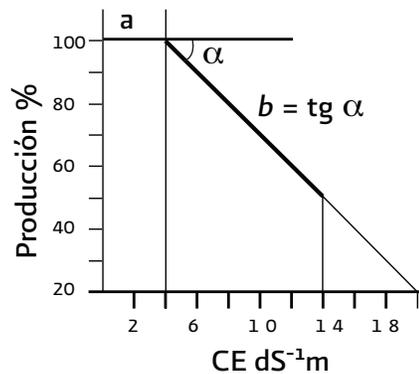


Figura 7.1. Reducción de la producción del cultivo de caña, en relación al aumento de la salinidad en la solución del suelo (extracto a saturación del suelo).

Cuadro 7.3. Reducción de la producción del cultivo de caña, en relación al aumento de la salinidad en la solución del suelo (extracto a saturación del suelo).

Ces (dS/m)	PC _s (%)	REDUCCIÓN PRODUCCIÓN (%)
1.7	100.0	0.0
3.3	90.8	9.2
4.2	83.9	16.1
6.0	75.3	24.7
7.5	66.7	33.4
10.4	50.0	50.0

$$L = \frac{RR_1}{(1 - FL)}$$

Donde:

$$FL_{rf} = \frac{CE_r}{2 * (CE_{zr})_{m\acute{a}x}}$$

El agua de riego tiene conductividad de 0.45 dS/m, y la conductividad del extracto de suelo a saturación es 3.0 dS/m (cuadro 7.3); se requiere que la conductividad eléctrica del extracto de suelo no se incremente, por lo que debe calcularse la fracción de lavado de sales.

Como el riego es frecuente, se utiliza la fórmula:

$$FL_{rf} = \frac{CE_r}{2 * (CE_{zr})_{m\acute{a}x}} = \frac{0.45}{2 * 3.0} = 0.075$$

De manera que la lámina total de riego ajustada para control de salinidad queda:

$$RR_{ajs} = \frac{97.08}{(1 - 0.075)} = 104.9 \text{ cm}$$

7.1.6. Ajuste de requerimiento de riego por aportación de manto freático

La mayoría de los cultivos son afectados cuando el manto freático es superficial y se mantiene en el perfil del suelo humedecido por arriba de la capacidad de campo.

La caña es un cultivo que tolera altos niveles de humedad en el suelo y manto freático cercano a la zona radical; esto puede interpretarse como que la profundidad es del orden de un metro en suelos de medios a ligeros. La franja capilar es una zona casi saturada que se extiende por arriba del nivel del agua. El agua se mueve a esta zona por acción capilar. Las raíces del cultivo, por lo general, no penetran más de 30 cm en esta franja.

Cuadro 7.4. Aportaciones del manto freático a la zona de las raíces.

MES	PROFUNDIDAD DE MANTO FREÁTICO (m)	APORTACIÓN DE MANTO FREÁTICO (mm)
Ene.	1.08	23.56
Feb.	1.13	19.60
Mar.	1.20	15.50
Abr.	1.24	14.70
Mayo.	1.30	12.09
Jun.	1.35	7.5
Jul.		
Ago.		
Sep.		
Oct.		
Nov.	0.96	38.10
Dic.	1.02	32.55
Total		163.55

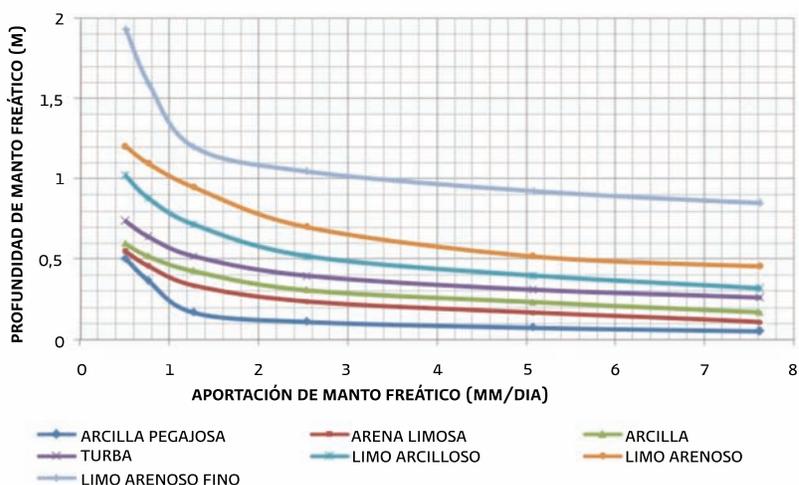


Figura 7.2. Contribución de las aguas subterráneas a la rizósfera en mm/día.

Como el suelo es limo arenoso y la profundidad del manto freático en la parcela varía de 0.96 m, en noviembre, a 1.35, en junio, y tomando la profundidad de cada mes de acuerdo con la figura 7.2 de aportaciones del manto freático a la zona de las raíces, se puede considerar que la aportación del manto freático es del orden de 163.5 mm en todo el año. Se consideró que en los cuatro meses de época de lluvia no hay aportaciones.

El requerimiento de riego correspondiente a la evapotranspiración, ajustado por lluvia aprovechable, fue 970.8 mm. Luego, se corrigió el requerimiento de riego por salinidad, calculándose con corrección por lámina de sobrerriego y quedó de 1,049.5 mm. Al ajustar, por aportación de manto freático, restándole los 163.5 mm estimados, quedan como requerimiento de riego 886.0 mm de lámina de agua.

7.1.7. Eficiencias de riego

¿Cuál es la eficiencia de riego?

La eficiencia de riego o de aplicación con el pivote fue:

$$ER = \frac{886.0}{1080.0} = 0.8203$$

¿Cuál fue la eficiencia de conducción?

El volumen extraído del pozo fue 886.905 millares de m³, y el volumen servido en la parcela fue de 540 millares de m³. Entonces, la eficiencia de conducción fue:

$$EC = \frac{540}{593} = 0.9106$$

$$EG = \frac{887 * 50 * 10000}{593 * 1000} = 0.7470$$

7.1.8. Pérdidas de agua

¿Cuánto fueron las pérdidas?

Las pérdidas de agua en la conducción fueron:

$$PC = 593 - 540 = 53 \text{ Mm}^3$$

Las pérdidas de agua en la parcela con riego por aspersión fueron por evaporación y arrastre por viento:

$$P_{aye} = 540 - 442.982 = 97.018 \text{ Mm}^3$$

Las pérdidas de agua totales fueron:

$$PT = 97.018 + 53 = 150.018 \text{ Mm}^3$$

7.1.9. Recomendaciones

De acuerdo con la información obtenida de los indicadores de producción, los resultados son buenos y solo se requiere afinar el fertirriego para obtener producciones mayores.

Se puede mejorar revistiendo la regadera excavada en tierra para subir la eficiencia de conducción y se puede ajustar la velocidad del pivote para reducir la lámina aplicada y mejorar la eficiencia de aplicación. Debe tenerse cuidado de tomar en cuenta las condiciones de viento y humedad en tiempo real para no cometer el error de aplicar láminas de riego menores a las necesarias.

Deben realizarse mediciones de: gastos, niveles de humedad en el suelo, parámetros meteorológicos para calcular las necesidades de riego en tiempo real, rendimientos. Deben utilizarse para darle seguimiento a la productividad y a las eficiencias de riego, con la finalidad de seguir con al propósito de mejora continua.

7.2. *Ejemplo de evaluación hidráulica de un sistema de riego de pivote central*

A continuación se presentan las acciones que se desarrollaron para evaluar el sistema de riego por aspersión tipo pivote.

7.2.1. Decisión y objetivos de la evaluación

Se decidió evaluar el sistema de riego porque el dueño quiso conocer el grado de desempeño del funcionamiento hidráulico y conocer los beneficios generados por la inversión.

Definición de objetivos. Obtener la uniformidad de aplicación del riego, el ahorro de agua y también acciones de mejora. Considerando dos velocidades de avance de la tubería regante, la acostumbrada por el productor y otra mayor para conocer su efecto en la lámina aplicada.

El dueño del predio concertó con un evaluador la ejecución de la evaluación.

7.2.2. Planeación de la evaluación

El proceso de evaluación se desarrolló siguiendo el plan de trabajo, que se anota a continuación:

Obtención de la información del predio y del sistema de riego.

Análisis de documentos y de la información.

Visita preliminar al sistema de riego.
 Definir los parámetros para evaluar el sistema de riego.
 Proyectar la prueba de uniformidad de lluvia.
 Diseñar la retícula o malla de pluviómetros.
 Proyectar el tiempo de riego de la prueba de uniformidad de lluvia.
 Proyectar la prueba de uniformidad hidráulica.
 Preparación de materiales y dispositivos.
 Ejecutar de trabajos de campo.
 Hacer el análisis y obtener los resultados.
 Establecer las conclusiones.
 Elaborar las recomendaciones.

7.2.3. Obtención de la información del predio

El evaluador procedió a la obtención de la información básica de los archivos y de la entrevista con el responsable del sistema de riego, y obtuvo lo siguiente: datos generales, datos de la fuente de abastecimiento, información del cultivo, de la pendiente del terreno y del suelo y datos del sistema de riego por aspersión.

Cuadro 7.5. Datos del predio, del usuario, del tipo de tenencia, superficie y localidad.

DATOS GENERALES	
Nombre	Agropecuaria El Toro
Nombre del predio o campo:	El Forrajero
Nombre del técnico:	Martín Gutierrez Campos
Tipo de tenencia:	Propiedad Privada
Superficie (ha):	40
Localidad:	Cosío
Municipio:	Cosío
Entidad Federativa:	Aguascalientes

Cuadro 7.6. Datos de la fuente de abastecimiento.

DATOS DE LA FUENTE DE ABASTECIMIENTO	
Gasto total al inicio (l/s):	56.29
Presión en el cabezal de control (kg/cm ²)	3.7

Cuadro 7.7. Datos del cultivo, de la pendiente del terreno y del suelo.

DATOS DEL CULTIVO, PENDIENTE Y DEL SUELO	
Cultivo:	Triticale
Fecha de siembra o años de plantación:	15-12-2009
Pendiente del terreno (%):	2%
Textura del suelo:	Franco arenoso

Cuadro 7.8. Datos del sistema de riego por aspersión.

DATOS DEL SISTEMA POR ASPERSIÓN	
Longitud de la tubería regante (m)	355
Número de torres del sistema	6
Espaciamiento entre torres (m)	56
Número de emisores en el pivote (m)	129
Presión en el aspersor (kg/cm ²)	3.5
Duración del riego (h)	36

7.2.4. Análisis de documentos e información

De acuerdo con los datos del usuario, considerando 56.29 l/s de gasto disponible, área regada 40 ha, regando 36 h por revolución y suponiendo eficiencia de 0.85, haciendo los cálculos necesarios, se puede aplicar una lámina de 1.82 cm.

7.2.5. Visita preliminar

En la visita preliminar se realizaron las acciones que se presentan a continuación:

Se localizó el predio, se hizo la inspección visual del sistema de riego y además se conoció el procedimiento de su operación.

Se encontró que no hay pérdidas por almacenamiento y por conducción, por lo que los factores que influyen en la eficiencia global del sistema de riego, son las pérdidas por arrastre y evaporación y las pérdidas por uniformidad de lluvia.

Medición de gasto (37.13 l/s) y presión (3.7 k/cm²) en el cabezal del sistema de riego.

Verificación de longitud de tubería regante y entre torres de la tubería regante.

7.2.6. Definición de parámetros de la evaluación

Se analizaron los parámetros para evaluar el sistema de riego y son los siguientes:

Eficiencia estadística de la aspersión o uniformidad de lluvia. Se requiere usar la uniformidad de lluvia ponderando las áreas dominadas por cada anillo de superficie regada y para esto se utiliza el coeficiente de uniformidad para pivotes centrales.

Eficiencia de distribución hidráulica o uniformidad de distribución hidráulica. Este parámetro no se utiliza porque la tubería regante se diseña con gasto variable en los aspersores proporcional al área que riegan, y generalmente con reguladores de presión.

Eficiencia de aplicación.

Eficiencia global del sistema de riego.

Pérdidas parciales y globales del sistema de riego.

7.2.7. Prueba de uniformidad de lluvia

Los trabajos desarrollados fueron los siguientes: prueba de uniformidad de lluvia, mediciones de campo y resultados,

- Línea de pluviómetros

Se diseñó la línea de los pluviómetros de la siguiente manera:

Se seleccionó el espacio comprendido entre dos torres (59.16 m) para la instalación de pluviómetros y se determinó como 13 el número de recipientes, espaciados a 4.55 m. En el campo en el primer tramo se instalaron 11 pluviómetros y en los demás se instalaron 13, integrando un total de 76 recipientes.

Cuadro 7.9. Tramo definido por número de torre y la cantidad de pluviómetros entre torres.

TRAMO	NÚMERO DE PLUVIÓMETROS
1 – 2	11
2 – 3	13
3 – 4	13
4 – 5	13
5 – 6	13
6 – 7	13
<i>Total</i>	<i>76</i>

Cada pluviómetro debe estar en un punto del radio medio del área con forma de anillo que representará. Si el espaciamiento entre pluviómetros es 4.55 m. entonces el punto de ubicación debe estar a una distancia del centro (pivote) igual al radio menor del anillo más la mitad de 4.55. No deben instalarse pluviómetros muy pegados a las torres del sistema de riego.

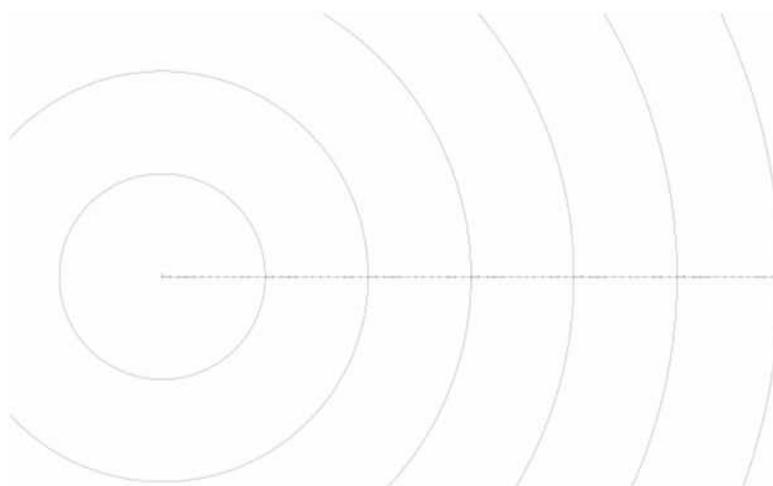


Figura 7.3. Línea de puntos para ubicación de los pluviómetros, para la prueba de aspersión.

- Mediciones de campo y resultados

Para realizar las mediciones de campo de las pruebas de uniformidad de lluvia y de distribución hidráulica, se llevaron los siguientes materiales y dispositivos:

Cintas métricas (metálica de 5 metros, de plástico de 50 metros).

Estacas metálicas para marcar la línea en campo.

Medidor de gasto portátil.

Manómetros (0 a 250 kPa, 0 a 400 kPa, 0 a 1000 kPa).

Tubo de pitot, manguera flexible para conectar manómetros.

Manguera flexible de 2.5 cm de diámetro interior y 3 metros de longitud.

Recipientes de plástico graduados, de 5, de 20 y 50 litros.

Probetas graduadas de 500 ml y un litro con graduaciones del orden de 2 a 10 ml por marca.

Cronómetro.

Botas de hule, impermeable, guantes, toalla y cambio de ropa.

Caja de herramientas (desarmador, pinzas, martillo, navaja, llaves estilson y perica).

Pluviómetros o botes para captar la lluvia generada por el aspersor, con el bordo delgado, sin deformaciones y con altura mínima de 15 cm.

Se procedió a instalar los pluviómetros en la línea marcada, se fijaron en las estacas para evitar que se voltearan los recipientes en las distancias proyectadas.

Cuadro 7.10. Datos de tiempos de la prueba.

CONCEPTO	TIEMPO (horas y min)
Hora de inicio de la prueba:	12:32
Hora final de la prueba:	14:15
Tiempo de riego	01:43

Se operó el sistema de riego durante una hora y 43 minutos para que la lluvia pasara sobre todos los botes y se captaron los volúmenes de agua que se muestran en el cuadro 1.6.:

Cuadro 7.11. Volúmenes de agua captados en la prueba de aspersión.

NUM ORDEN	VOLÚMENES cm ³	LÁMINA mm	DI*LI	LI-LMPOND	LI-LM	DI*L (I-LM)
3	70	7.571	22.713	-8.433	8.433	25.298
4	195	21.090	84.361	5.087	5.087	20.347
5	145	15.682	78.412	-0.321	0.321	1.605
6	238	25.741	154.445	9.737	9.737	58.424
7	120	12.979	90.850	-3.025	3.025	21.174
8	110	11.897	95.176	-4.106	4.106	32.852
9	95	10.275	92.472	-5.729	5.729	51.559
10	215	23.253	232.533	7.250	7.250	72.498
11	226	24.443	268.873	8.440	8.440	92.835
12	160	17.305	207.657	1.301	1.301	15.615
13	122	13.195	171.534	-2.809	2.809	36.512

Cuadro 7.11. Volúmenes de agua captados en la prueba de aspersión.

NUM ORDEN	VOLÚMENES cm ³	LÁMINA mm	DI*LI	LI-LMPOND	LI-LM	DI*L (I-LM)
14	130	14.060	196.842	-1.943	1.943	27.207
15	55	5.949	89.228	-10.055	10.055	150.825
16	195	21.090	337.443	5.087	5.087	81.387
17	40	4.326	73.545	-11.677	11.677	198.514
18	155	16.764	301.752	0.761	0.761	13.689
19	110	11.897	226.044	-4.106	4.106	78.023
20	220	23.794	475.881	7.791	7.791	155.811
21	160	17.305	363.400	1.301	1.301	27.327
22	130	14.060	309.323	-1.943	1.943	42.754
23	195	21.090	485.075	5.087	5.087	116.994
24	225	24.335	584.036	8.331	8.331	199.952
25	180	19.468	486.697	3.464	3.464	86.609
26	115	12.438	323.383	-3.566	3.566	92.708
27	145	15.682	423.426	-0.321	0.321	8.668
28	125	13.519	378.542	-2.484	2.484	69.556
29	85	9.193	266.602	-6.810	6.810	197.500
30	210	22.713	681.376	6.709	6.709	201.271
31	65	7.030	217.932	-8.973	8.973	278.176
32	145	15.682	501.839	-0.321	0.321	10.273
33	100	10.815	356.911	-5.188	5.188	171.204
34	125	13.519	459.658	-2.484	2.484	84.461
35	130	14.060	492.105	-1.943	1.943	68.018
36	180	19.468	700.844	3.464	3.464	124.718
37	228	24.659	912.395	8.656	8.656	320.265
38	230	24.876	945.274	8.872	8.872	337.141
39	140	15.142	590.526	-0.862	0.862	33.611
40	140	15.142	605.667	-0.862	0.862	34.473
41	120	12.979	532.122	-3.025	3.025	124.022
42	190	20.549	863.076	4.546	4.546	190.929
43	170	18.386	790.612	2.383	2.383	102.462
44	155	16.764	737.616	0.761	0.761	33.462
45	160	17.305	778.715	1.301	1.301	58.558
46	195	21.090	970.149	5.087	5.087	233.988
47	140	15.142	711.659	-0.862	0.862	40.505
48	155	16.764	804.672	0.761	0.761	36.504
49	190	20.549	1006.922	4.546	4.546	222.750
50	285	30.824	1541.207	14.821	14.821	741.032
51	165	17.846	910.123	1.842	1.842	93.945
52	110	11.897	618.646	-4.106	4.106	213.536
53	105	11.356	601.882	-4.647	4.647	246.304
54	130	14.060	759.247	-1.943	1.943	104.942

Cuadro 7.11. Volúmenes de agua captados en la prueba de aspersión.

NUM ORDEN	VOLÚMENES cm ³	LÁMINA mm	DI*LI	LI-LMPOND	LI-LM	DI*L (I-LM)
55	125	13.519	743.565	-2.484	2.484	136.628
56	160	17.305	969.068	1.301	1.301	72.872
57	165	17.846	1017.197	1.842	1.842	104.997
58	105	11.356	658.663	-4.647	4.647	269.540
59	120	12.979	765.737	-3.025	3.025	178.470
60	225	24.335	1460.091	8.331	8.331	499.881
61	215	23.253	1418.451	7.250	7.250	442.238
62	262	28.337	1756.868	12.333	12.333	764.651
63	148	16.007	1008.436	0.003	0.003	0.216
64	70	7.571	484.534	-8.433	8.433	539.690
65	100	10.815	703.007	-5.188	5.188	337.221
66	110	11.897	785.204	-4.106	4.106	271.027
67	155	16.764	1123.188	0.761	0.761	50.954
68	235	25.416	1728.315	9.413	9.413	640.077
69	155	16.764	1156.716	0.761	0.761	52.475
70	145	15.682	1097.772	-0.321	0.321	22.473
71	95	10.275	729.505	-5.729	5.729	406.744
72	100	10.815	778.715	-5.188	5.188	373.537
73	150	16.223	1184.296	0.220	0.220	16.040
74	162	17.521	1296.561	1.518	1.518	112.302
75	105	11.356	851.720	-4.647	4.647	348.543
76	70	7.571	575.384	-8.433	8.433	640.882
77	115	12.438	957.711	-3.566	3.566	274.558
78	130	14.060	1096.690	-1.943	1.943	151.583
3078			49258.81			12790.39
		Lmedpond	16.0035			0.2597
				Coeficiente de uniformidad pivote		74.03

Con la finalidad de interpretar directamente los resultados, se calcularon las láminas aplicadas dividiendo los volúmenes captados (mililitros o centímetros cúbicos) entre el área de los botes (centímetros cuadrados), se obtuvo la lámina (cm) que se captó de la lluvia.

- Análisis de resultados

Coeficiente de uniformidad para pivotes (CUP).

$$CUP = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n D_i |V_i - V_m|}{\sum_{i=1}^n V_i * D_i} \right) * 100$$

Donde.

CUP – Coeficiente de uniformidad de Christiansen adaptado a pivotes.

Vi –Volumen captado en el recipiente iesimo (cc) o lámina correspondiente (mm).

V_m – Volumen medio ponderado captado en la muestra (cc) o lámina correspondiente (mm).
 D_i – Superficie dominada o considerada para el recipiente de captación i , o también la posición ocupada por el pluviómetro i , empezando con el 1, el más cercano al centro del pivote y n el más alejado (m^2).
 n – Número de recipientes de captación.

Para el cálculo de los parámetros estadísticos se usó hoja de cálculo y los resultados son los siguientes:

Cuadro 7. 12. Parámetros estadísticos de la prueba de la lluvia.

CONCEPTO	VALOR
Media (cm/h)	16.0035
Coefficiente de uniformidad para pivotes centrales	74.03

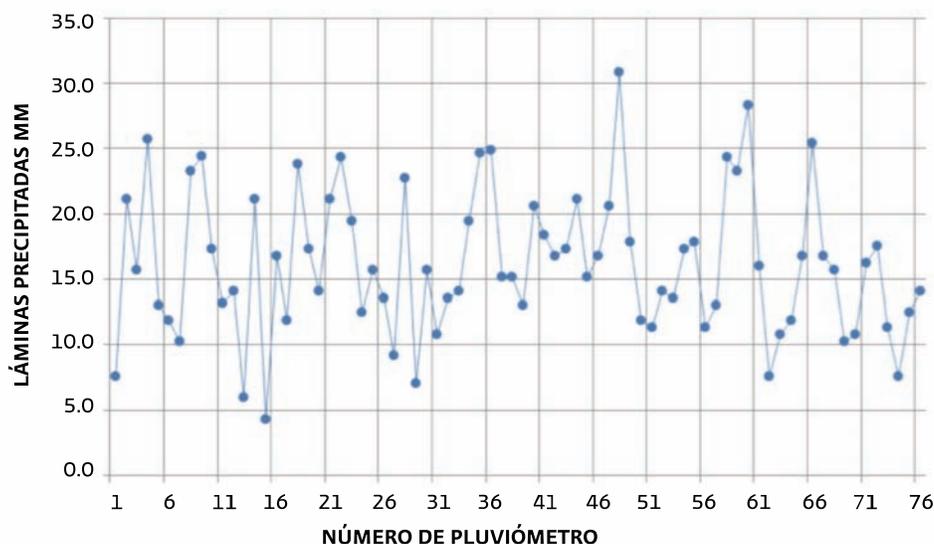


Figura 7.4. Láminas precipitadas por revolución de 36 horas.

Cuadro 7.13. Láminas medias aritméticas captadas entre los tramos de las torres, diferencia con la media y condición de riego.

NO. DE ORDEN POR TRAMO	LÁMINA MEDIA MM	DIFERENCIA CON LA MEDIA DEL PIVOTE MM	CONDICIÓN DE RIEGO
1	16.676	0.529	EXCEDIDA
2	15.809	-0.338	DEFICIENTE
3	15.874	-0.272	DEFICIENTE
4	18.095	1.949	EXCEDIDA
5	16.057	-0.090	DEFICIENTE
6	14.368	-1.779	DEFICIENTE
MEDIA	16.146	0.0	

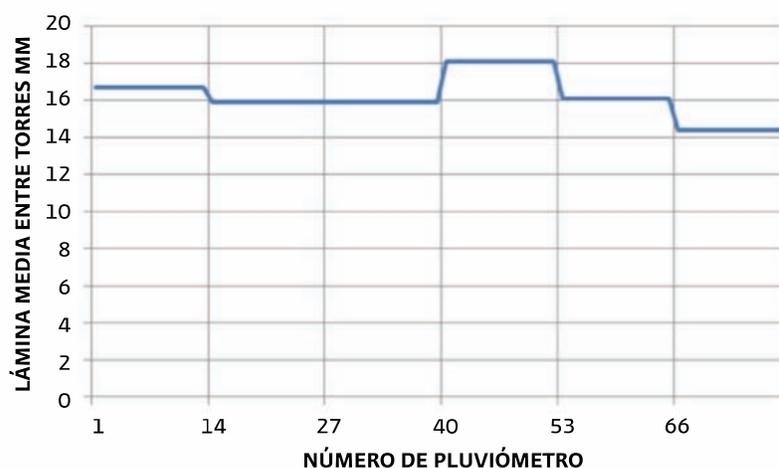


Figura 7.5. Láminas medias precipitadas entre torres.

Cuadro 7.14. Parámetros estadísticos de la prueba de lluvia del pivote

CONCEPTO	VALOR
Media ponderada(mm)	16.0035
Coefficiente de variación estadístico para pivotes (%)	0.3327
Coefficiente de uniformidad estadística para pivotes (%) o Eficiencia estadística (1-CV)	66.73

7.2.8. Recomendaciones

Primera opción. Revisar el sistema de filtrado para asegurarse que las diferencias de precipitación no se deban a obstrucción de aspersores y si hay obstrucciones deberá ponerse un sistema de filtrado para evitar los taponamientos y efectuar la limpieza de los aspersores. En el caso de que no haya obstrucciones en los aspersores, deberá aplicarse el procedimiento de la segunda opción.

Segunda opción. Se recomienda poner los pluviómetros en los mismos sitios y repetir la prueba otras dos veces, sumar los volúmenes captados y hacer el análisis de los resultados, con la finalidad de obtener el efecto de compensación que se presenta generalmente en sistemas de riego por aspersión móviles, causado por las diferencias de precipitación en los mismos sitios, y verificar si mejoró la uniformidad. En el caso de que no mejoró, aplicar la tercera opción.

Tercera opción. Entre la tercera y la cuarta torre, la media de la precipitación es mayor que la lámina media del pivote por lo que debe instalarse boquillas de menor gasto para tratar de igualar las láminas de riego y en el caso de los aspersores entre las torres penúltima y la última debe aumentarse el gasto de los aspersores para igualar la lámina de riego, porque la lámina de riego es menor que la media del pivote. Estas acciones debe realizarlas un profesional de la empresa que instaló el sistema de riego, verificando el funcionamiento

hidráulico de los aspersores aforando en los tramos que se detectaron problemas, porque debe cumplir las especificaciones de proyecto y hacer los ajustes necesarios.

7.3. Ejemplo de evaluación de un sistema de riego por aspersión portátil manual

A continuación se presentan las acciones que se desarrollaron para evaluar el sistema de riego por aspersión.

7.3.1. Decisión y objetivos de la evaluación

Se decidió evaluar el sistema de riego porque el dueño recibió apoyo económico para la adquisición e instalación del sistema de riego y quiso evaluarlo para conocer los beneficios generados por la inversión al cambiar de método de riego.

Definición de objetivos. Obtener la productividad del agua, la uniformidad de aplicación, el ahorro de agua y de energía y también acciones de mejora posibles.

El dueño del predio concertó con un evaluador la ejecución de la evaluación.

7.3.2. Planeación de la evaluación

El proceso de evaluación se desarrolló siguiendo el plan de trabajo, que se anota a continuación:

Obtención de la información del predio y del sistema de riego.

Análisis de documentos y de la información.

Visita preliminar al sistema de riego.

Definir los parámetros para evaluar el sistema de riego.

Proyectar la prueba de uniformidad de lluvia.

Diseñar la retícula o malla de pluviómetros.

Proyectar el tiempo de riego de la prueba de uniformidad de lluvia.

Proyectar la prueba de uniformidad hidráulica.

Preparación de materiales y dispositivos.

Ejecución de trabajos de campo.

Resultados y análisis.

Conclusiones.

Recomendaciones.

7.3.3. Obtención de la información del predio

El evaluador procedió a la obtención de la información básica de los archivos y de la entrevista con el responsable del sistema de riego, y obtuvo lo siguiente:

Cuadro 7.15. Datos generales del predio, propietario y evaluador.

DATOS GENERALES	
Nombre	Liberto Zavala Ramírez
Nombre del predio o campo:	El Forrajero
Nombre del técnico:	Martín Rubio Moreno
Tipo de tenencia:	Propiedad Privada
Superficie (ha):	15
Localidad:	Ojo de agua
Municipio:	El llano
Entidad Federativa:	Aguascalientes

Cuadro 7.16. Datos de la fuente de abastecimiento.

DATOS DE LA FUENTE DE ABASTECIMIENTO	
Gasto total al inicio (l/s):	6.5
Presión en el cabezal de control (kg/cm ²)	4.5

Cuadro 7.17. Datos del cultivo, de la pendiente del terreno y del suelo.

DATOS DEL CULTIVO, PENDIENTE Y DEL SUELO	
Cultivo:	Alfalfa
Fecha de siembra o años de plantación:	3 años
Pendiente del terreno (%):	1%
Textura del suelo:	Franco arcillo arenoso

Cuadro 7.18. Datos del sistema de riego por aspersión.

DATOS DEL SISTEMA POR ASPERSIÓN	
Longitud de distribuidor (m)	82,8
Número de regantes en el distribuidor	2
Espaciamiento entre regantes (m)	12
Espaciamiento entre emisores (m)	9
Presión en la UCA (kg/cm ²)	3.5
Longitud de la regante (m)	90
Número de emisores	10
Presión en el aspersor (kg/cm ²)	2.5
Duración del riego (h)	9

7.3.4. Análisis de documentos e información

De acuerdo con los datos del usuario, considerando 6.5 l/s de gasto disponible, área por aspersor 108 m², regando las 24 h por día incluyendo los movimientos de las tuberías regantes, y suponiendo eficiencia de 0.85, haciendo los cálculos necesarios, se puede dominar en época de máxima demanda del orden de 9 ha. En invierno considerando la demanda **mínima, se podría regar 18 ha.**

7.3.5. Visita preliminar

En la visita preliminar se realizaron las acciones que se presentan a continuación:

Se localizó el predio, se hizo la inspección visual del sistema de riego y además se conoció el procedimiento de su operación.

Se encontró que no hay pérdidas por almacenamiento y por conducción, por lo que los factores que influyen en la eficiencia global del sistema de riego, son la uniformidad hidráulica del sistema, las pérdidas por arrastre y evaporación y las pérdidas por uniformidad de lluvia.

Medición de gasto (4.9 l/s) y presión (4.5 k/cm²) en el cabezal del sistema de riego.

Verificación de espaciamientos entre aspersores y entre tuberías regantes.

7.3.6. Definición de parámetros de la evaluación

Se definieron los parámetros para evaluar el sistema de riego, que son los siguientes:

Eficiencia estadística de la aspersión o uniformidad de lluvia.

Eficiencia de distribución hidráulica o uniformidad de distribución hidráulica.

Eficiencia de aplicación.

Eficiencia global del sistema de riego.

Pérdidas parciales y globales del sistema de riego.

7.3.7. Trabajos desarrollados

Se realizaron los trabajos de campo para determinar la eficiencia estadística de la aspersión o uniformidad de lluvia, la uniformidad de distribución hidráulica, la eficiencia de aplicación, la eficiencia global del sistema de riego y las **pérdidas parciales y globales del sistema de riego**.

7.3.7.1. PRUEBA DE UNIFORMIDAD DE LLUVIA

- Retícula o malla

Se diseñó la retícula o malla para la instalación de los pluviómetros de la siguiente manera:

Se seleccionó el área comprendida entre cuatro aspersores de dos tuberías trabajando simultáneamente y se seleccionó 36 como el número de observaciones, para obtener 6 líneas de pluviómetros entre los aspersores y 6 líneas entre las dos tuberías.

Cada pluviómetro debe estar al centro del área que representa, en este caso corresponde a rectángulos que se forman de la siguiente forma:

Espaciamiento entre aspersores = 9 m. y como son 6 pluviómetros, la separación entre recipientes corresponde a $9/6$, que es 1.5 m. y son 6 espaciamientos de esa dimensión y dos de 0.75 m. en las orillas, entre el pluviómetro y la línea de aspersores. Entonces un lado del rectángulo de área representada por el pluviómetro es 1.5 m.

Espaciamiento entre tuberías regantes = 12 m. y como son 6 pluviómetros, la separación entre recipientes corresponde a 2 m. y en las orillas queda 1.0 m. entre el pluviómetro y la tubería regante. Entonces el otro lado del rectángulo de área representada por el pluviómetro es 2.0 m. En la Figura 1.1. Se presenta la retícula o malla de puntos de ubicación de los recipientes.

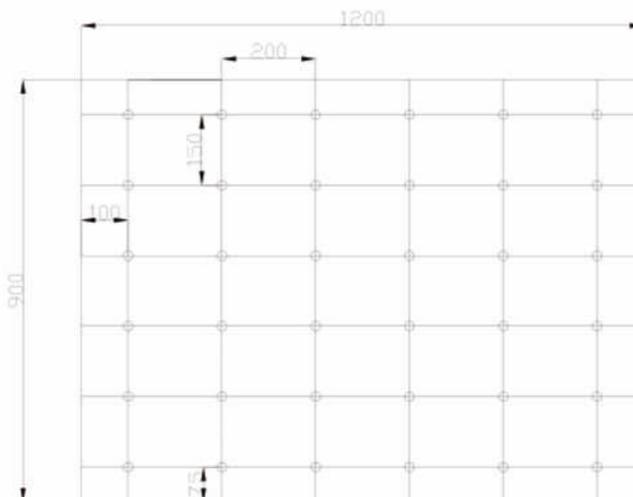


Figura 7.6. Retícula de puntos para ubicación de los pluviómetros, para la prueba de aspersión.

- Materiales y dispositivos

Para realizar las mediciones de campo de las pruebas de uniformidad de lluvia y de distribución hidráulica, se utilizaron los siguientes materiales y dispositivos:

Cintas métricas (metálica de 5 metros, de plástico de 50 metros).

Estacas metálicas o de madera para marcar la retícula en campo.

Medidor de gasto portátil.

Manómetros (0 a 250 kPa, 0 a 400 kPa, 0 a 1000 kPa) (0-2.5 kg/cm²; 0-4 kg/cm² y 0-10kg/cm²).

Tubo de pitot, manguera flexible para conectar manómetros.

Manguera flexible de 2.5 cm de diámetro interior y 3 metros de longitud.

Recipientes de plástico graduados, de 5, de 20 y 50 litros.

Probetas graduadas de 500 ml y un litro con graduaciones mínimas del orden de 2 a 10 ml.

Cronómetro.

Botas de hule, impermeable, guantes, toalla y cambio de ropa.

Caja de herramientas (desarmador, pinzas, martillo, navaja, llaves estilson y perica).

Pluviómetros o botes para captar la lluvia generada por el aspersor, con el borde delgado, sin deformaciones y con altura mínima de 15 cm.

- Actividades realizadas en la prueba

Se seleccionó el sitio de muestreo en la parte final de las tuberías, para captar las cantidades menores de agua que corresponden a las láminas de riego mínimas.

Se procedió a instalar los pluviómetros en la retícula marcada, se fijaron en estacas para evitar que se voltearan los recipientes.

Cuadro 7.19. Tiempos de la prueba.

CONCEPTO	CANTIDAD / UNIDAD	
Hora de inicio de la prueba: (horas y minutos)	12	20
Hora del final de la prueba: (horas y minutos)	14	20
Tiempo total de la prueba: (hora decimal)	2.0	

Se operó el sistema de riego durante dos horas para captar los volúmenes de agua en los recipientes y se muestran en el cuadro 7.7.

Cuadro 7.20. Volúmenes de agua captados en dos horas de pruebas de aspersión.

NO. DE ORDEN	1	2	3	4	5	6
1	109	93	57	60	91	106
2	103	92	52	54	90	102
3	89	88	48	50	86	87
4	94	100	44	48	98	92
5	106	104	46	50	102	106
6	109	107	50	52	102	108

Con la finalidad de interpretar directamente los resultados, se calcularon las láminas aplicadas dividiendo los volúmenes captados (mililitros o centímetros cúbicos) entre el área de los botes (centímetros cuadrados), se obtuvo la lámina (cm) que se captó de la lluvia durante dos horas y dividiendo los datos entre dos, se obtienen los correspondientes a una hora de precipitación, los resultados se muestran en el Cuadro 7.21.

Cuadro 7.21. Datos de la precipitación captada transformados a mm/h.

NO. DE ORDEN	1	2	3	4	5	6
1	0.86	0.73	0.45	0.47	0.71	0.83
2	0.81	0.72	0.41	0.43	0.70	0.80
3	0.70	0.69	0.38	0.40	0.67	0.68
4	0.74	0.78	0.35	0.38	0.77	0.72
5	0.83	0.81	0.36	0.40	0.80	0.83
6	0.86	0.84	0.40	0.41	0.80	0.85

- Análisis de la uniformidad de lluvia

Para el cálculo de los parámetros estadísticos se usó hoja de cálculo y los resultados son los siguientes:

Cuadro 7.22. Parámetros estadísticos de la prueba de la lluvia

CONCEPTO	VALOR
Media (cm/h)	0.649
Desviación Estándar (cm)	0.184
C.V. (coeficiente de variación)	0.284
Eficiencia estadística (1-CV)	0.716
Rango (cm)	0.507

La lámina precipitada horaria: fue 0.65 cm/h.

El cálculo del coeficiente de variación de la lluvia se realizó dividiendo la desviación estándar entre la media y la eficiencia estadística, restando de uno el coeficiente de variación. Los datos se observan en el cuadro de parámetros estadísticos.

Como el coeficiente de variación es 0.284 por lo que se considera que la uniformidad de lluvia es baja y esto se refleja en la eficiencia estadística, que fue 0.716, por abajo del límite del indicador recomendado, que el valor 0.8 es el mínimo aceptable.

Se comprueba que la uniformidad baja, porque el rango es mayor que la mitad de la media.

En la gráfica de los datos de lluvia se observa que a lo largo de las tuberías regantes, o sea del espaciamiento más corto entre aspersores, el traslape permite regar más parejo. Contrario a esto, a la mitad de las dos tuberías se observa una franja con láminas de riego muy pequeñas (franja de líneas 3 y 4), por lo que se deduce que el espaciamiento entre las tuberías regantes fue grande para el tipo de aspersor o para la presión de operación del aspersor.

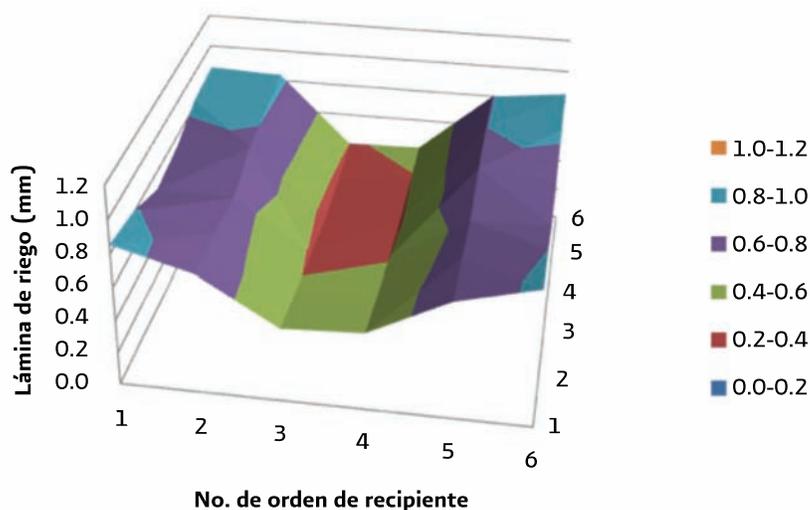


Figura 7.7. Láminas precipitadas por hora con espaciamientos de 9 m por 12m.

- Simulación de traslape

Con la información de la lluvia se simuló un traslape de los recipientes de las líneas 3 y 4, quedando la el reporte de láminas precipitadas como se presenta a continuación.

Cuadro 7.23. Láminas captadas simulando el traslape, cerrando las tuberías a 9 m. de espaciamiento.

NO. DE ORDEN	1	2	3	4	5
1	0.86	0.73	0.93	0.71	0.83
2	0.81	0.72	0.84	0.70	0.80
3	0.70	0.69	0.78	0.67	0.68
4	0.74	0.78	0.73	0.77	0.72
5	0.83	0.81	0.76	0.80	0.83
6	0.86	0.84	0.81	0.80	0.85

En la gráfica correspondiente, se observa que el rango de valores se redujo y que mejoró la uniformidad de lluvia, porque se ve más pareja la superficie de láminas precipitadas. Aunque en la línea de traslape se aplican las láminas mayores.

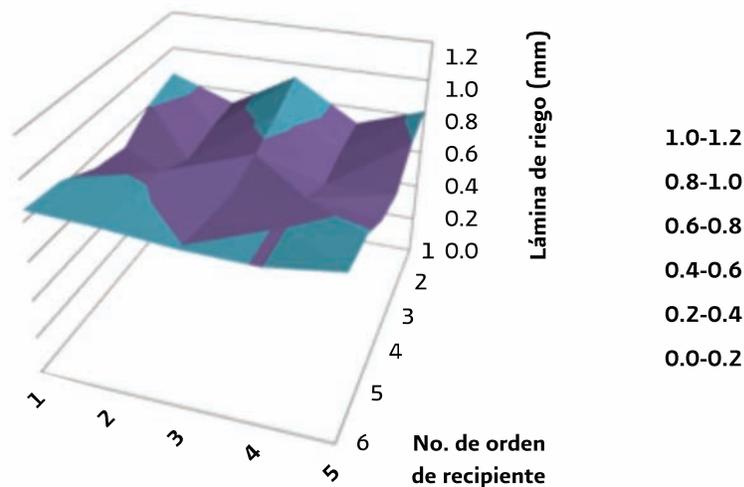


Figura 7.8. Láminas precipitadas con traslape 9 m, por 9 m.

Para confirmar la apreciación gráfica, en el cuadro de datos estadísticos se observa que la lámina precipitada horaria se incrementó a 0.78 cm/h, la desviación estándar se mejoró porque se redujo la dispersión de datos y el coeficiente de variación se redujo prácticamente a 0.082 y por lo tanto, le eficiencia estadística fue de 0.918. Al ser superior a 0.800, indica que es buena la nueva distribución del agua y que se reducen las pérdidas de agua por falta de uniformidad de lluvia. Esto indica que una solución aceptable es reducir el espaciamiento entre las tuberías regantes a 9 m. Otra solución sería cambiar la boquilla de los aspersores de manera que el diámetro de cobertura fuera 24 m. (con el mismo gasto de entrada en las tuberías regantes). Esto también mejoraría el traslape entre las regantes.

Cuadro 7.24. Parámetros estadísticos de la prueba de lluvia considerando traslape de 9 m. por 9 m.

CONCEPTO	VALOR	
Media (cm/h)	0.639	0.779
Desviación Estándar (cm)	0.139	0.064
C.V. (coeficiente de variación)	0.218	0.082
Eficiencia estadística (1-CV)	0.782	0.918
Rango (cm)	0.37	0.252

7.3.7.2. PRUEBA DE UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN HIDRÁULICA

Como el sistema de riego por aspersión opera con dos tuberías regantes y cada una de estas con 10 aspersores, además considerando que se sugiere un tamaño de muestra de 16 aforos, se decidió medir el gasto de todos los aspersores.

Se escogió el tiempo de aforo de 36 segundos, para que al multiplicar por 100 los litros captados en ese lapso de tiempo, se obtuvieran litros por hora suministrados por el aspersor. Que

considerando la combinación de errores en la medición, es decir captando agua un segundo antes y un segundo después de lo programado, se fallaría aproximadamente en un 5.5 % con respecto a la media de volúmenes captados.

Los datos de los volúmenes obtenidos en los aforos se presentan en los cuadros 7.25. y 7.26.

Cuadro 7.25. Volúmenes captados en la descarga de los aspersores (1) en 36 segundos de flujo.

VOLÚMENES CAPTADOS EN 36 S.			
TUBERÍA REGANTE 1			
No. De Orden	Rep. 1	Rep. 2	Media
1	9.45	9.30	9.38
2	9.25	9.15	9.20
3	8.95	9.00	8.98
4	8.93	9.07	9.00
5	8.85	8.83	8.84
6	8.81	8.78	8.80
7	8.75	8.85	8.80
8	8.45	8.35	8.40
9	8.29	8.16	8.23
10	8.20	8.10	8.15

Cuadro 7.26. Volúmenes captados en la descarga de los aspersores (2) en 36 segundos de flujo.

VOLÚMENES CAPTADOS EN 36 S.			
TUBERÍA REGANTE 2			
No. De Orden	Rep. 1	Rep. 2	Media
1	8.64	8.64	8.64
2	8.57	8.5	8.54
3	8.48	8.38	8.43
4	8.46	8.46	8.46
5	8.42	8.40	8.41
6	8.38	8.36	8.37
7	8.35	8.4	8.38
8	8.28	8.3	8.29
9	8.1	7.9	8.00
10	8.05	8	8.03

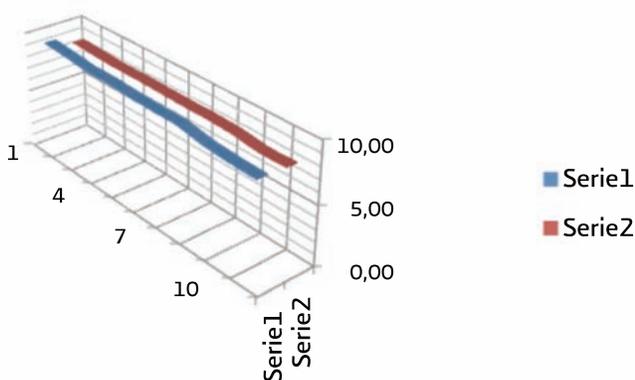


Figura 7.9. Volúmenes captados en los aforos de todos los aspersores de las dos tuberías.

Se ordenaron los datos de mayor a menor, se calculó la media general, luego la media del cuarto bajo (5 valores menores) y por último la eficiencia de distribución hidráulica, dividiendo la media del cuarto bajo entre la media general.

Cuadro 7.27. Volúmenes captados ordenados de mayor a menor.

DATOS ORDENADOS	
VOLUMEN (L/36S)	GASTO (l/s)
9.38	0.260
9.20	0.256
9.00	0.250
8.98	0.249
8.84	0.246
8.80	0.244
8.80	0.244
8.64	0.240
8.54	0.237
8.46	0.235
8.43	0.234
8.41	0.234
8.40	0.233
8.38	0.233
8.37	0.233
8.29	0.230
8.23	0.228
8.15	0.226
8.03	0.223
8.00	0.222

Los resultados se muestran a continuación en el cuadro 7.28.

Cuadro 7.28. Parámetros de la prueba de uniformidad de distribución hidráulica.

CONCEPTO	VALOR
Media general	0.238
Media del cuarto bajo	0.226
Eficiencia de distribución hidráulica	0.95

La eficiencia de distribución hidráulica es excelente, por lo que el sistema de riego opera dentro de los límites de aceptación del proyecto, también indica que la diferencia de descargas entre los aspersores y el de menor gasto, en su mayoría no rebasa el 10 %.

7.3.7.3. PÉRDIDAS POR ARRASTRE Y EVAPORACIÓN

La lámina suministrada por los aspersores en la zona de la prueba menos la lámina precipitada horaria captada en los pluviómetros, corresponde a la lámina perdida por hora de operación y se obtuvo de la manera siguiente:

Cuadro 7. 29. Datos para el cálculo del cuarto bajo.

NO. ASPERSOR	GASTO (l/s)
1	0.228
2	0.226
3	0.223
4	0.222
Media	0.225

El gasto de 0.225 l/s en una hora aplica un volumen de 810 litros o 0.810 m³, que divididos entre 108 m² da una lámina suministrada horaria de 7.5 mm/h.

Pérdida por arrastre y evaporación horaria = 7.5 – 6.4 = 1.1 mm/h.

La eficiencia por arrastre y evaporación es el cociente de dividir la lámina captada entre la lámina suministrada, entonces queda: 6.4 / 7.5 = 0.853

7.3.7.4. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE LOS TRABAJOS DE CAMPO

Eficiencia estadística = 0.782.

Eficiencia de distribución hidráulica = 0.950.

Eficiencia de arrastre y evaporación = 0.853.

A continuación se presenta el cuadro resumen de los cálculos desarrollados en la evaluación del sistema de riego.

Cuadro 7.30. Cuadro resumen de datos calculados en la evaluación del sistema de riego por aspersión.

CONCEPTO	FÓRMULA, DATO	EFICIENCIA	LÁMINA cm	PÉRDIDAS CM
Requerimiento de riego cm	RR		6	
Eficiencia estadística	1-CV	0.782		
Lámina de riego neta (LRN)	$LRN=RR/(1-CV)$		7.67	
Pérdidas por uniformidad de lluvia (Pull)	$Pull=LRN-RR$			1.67
Eficiencia por evaporación y arrastre (Eeya)	$Eeya$	0.853		
Lámina de riego ajustada por evaporación y arrastre (LRAeya)	$LRAeya=LRN/Eeya$		8.99	
Pérdidas por evaporación y arrastre (Peaya)	$Peaya=LRAeya-LRN$			1.32

Eficiencia de distribución hidráulica (Eudh)	$Eudh$	0.95		
Lámina de riego ajustada por uniformidad de distribución hidráulica (LRAudh)	$LRAudh=LRAeya/Eudh$		9.47	
Pérdidas por uniformidad de distribución hidráulica (Pudh)	$Pudh=LRAudh-LRAeya$			0.47
Suma pérdidas (SP)				3.47
Eficiencia global (EG)	$EG=RR/LB$	0.63		

La eficiencia global de 0.63 obtenida del producto de las tres eficiencias parciales o del cociente de dividir la lámina de requerimiento de riego entre la lámina bruta total, resultó muy baja, por lo que es necesario corregir el traslape o cambiar boquillas a los aspersores con mayor alcance y con el mismo gasto, o haciendo el ajuste de gastos y presiones necesarios para no bajar la eficiencia de distribución hidráulica.

7.3.7.5. ANÁLISIS DE SIMULACIÓN DE RIEGO CON TRASLAPE MEJORADO (9*9)

Para conocer los beneficios de hacer la mejora de traslapes de las tuberías regantes, se usaron los datos de la simulación del traslape y se obtuvieron los resultados siguientes:

El tiempo de riego con el traslape propuesto corresponde a el cociente de dividir 6 cm de la lámina de proyecto entre 0.77 cm/h que es la nueva intensidad de aplicación con el traslape, y resultó de 7.79 horas, o sea prácticamente 8 horas.

El gasto de 0.225 l/s en una hora aplica un volumen de 810 litros o 0.810 m³, que divididos entre 81 m² da una lámina suministrada horaria de 10 mm/h.

Como la pérdida por arrastre y evaporación horaria es de 1.1 mm/h., la lámina que se precipitaría ahora sería 10.0 mm/h menos las pérdidas por arrastre y evaporación que son 1.1 mm/h, por lo que la lámina precipitada horaria sería de 8.9 mm/h.

La eficiencia por arrastre y evaporación es el cociente de dividir la lámina captada entre la lámina suministrada, entonces queda: $8.9 / 10.0 = 0.89$. Si se riegan 8 horas y la pérdida por arrastre y evaporación fuera constante de 1.1 mm/h (en el peor de los casos), en todo el riego serían de 8.8 mm de pérdidas.

Eficiencia estadística = 0.918. Eficiencia de distribución hidráulica = 0.950. Eficiencia de arrastre y evaporación = 0.89

Haciendo los cálculos se obtiene el cuadro 1.31.

Cuadro 7.31. Cuadro resumen de cálculos realizados en la evaluación del sistema de riego con simulación de mejor traslape de lluvia.

CONCEPTO	FÓRMULA, DATO	EFICIENCIA	LÁMINA cm	PÉRDIDAS CM
Requerimiento de riego cm	RR		6	
Eficiencia estadística	1-CV	0.918		
Lámina de riego neta (LRN)	$LRN=RR/(1-CV)$		6.54	
Pérdidas por uniformidad de lluvia (Pull)	$Pull=LRN-RR$			0.54
Eficiencia por evaporación y arrastre (Eeya)	Eeya	0.89		
Lámina de riego ajustada por evaporación y arrastre (LRAeya)	$LRAeya=LRN/Eeya$		7.34	
Pérdidas por evaporación y arrastre (Peya)	$Peya=LRAeya-LRN$			0.81
Eficiencia de distribución hidráulica (Eudh)	Eudh	0.95		
Lámina de riego ajustada por uniformidad de distribución hidráulica (LRAudh)	$LRAudh=LRAeya/Eudh$		7.73	
Pérdidas por uniformidad de distribución hidráulica (Pudh)	$Pudh=LRAudh-LRAeya$			0.39
Suma pérdidas (SP)				1.73
Eficiencia global (EG)	$EG=RR/LB$	0.78		



Figura 7.10. Sistema de aspersión portátil manual evaluado.

7.3.7.6. RECOMENDACIONES DE MEJORA DE ACUERDO CON LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO

De la prueba de la lluvia generada por el sistema de riego se obtuvieron los resultados siguientes: el coeficiente de variación fue 0.284 por lo que se consideró que la uniformidad de

lluvia es baja y esto se refleja en la eficiencia estadística de la aspersión, que fue 0.716 por abajo del límite del indicador recomendado, siendo 0.8 el mínimo aceptable.

La solución es reducir el espaciamiento entre las tuberías regantes a 9 m. para evitar la franja regada con déficit. Otra solución sería cambiar la boquilla de los aspersores de manera que el diámetro de cobertura fuera 24 m. (con el mismo gasto de las tuberías regantes). Esto también mejoraría el traslape entre las regantes.

Eficiencia de distribución hidráulica o uniformidad de distribución hidráulica. El sistema funciona muy bien incluyendo la pendiente del terreno.

La eficiencia de aplicación se compone de la eficiencia estadística y de eficiencia por arrastre y evaporación, de manera que en el caso de la prueba de riego queda como se indica a continuación:

$$\text{Eficiencia de aplicación} = 0.782 \cdot 0.853 = 0.667$$

En el caso de la simulación con traslape queda como se indica a continuación:

$$\text{Eficiencia de aplicación} = 0.918 \cdot 0.89 = 0.817$$

Se espera que la eficiencia de aplicación mejore un 15 % al mejorar el traslape y que el productor no necesite humedecer más la parte mal regada.

Eficiencia global del sistema de riego.

Al aplicar las mejoras se espera que la eficiencia global del sistema de riego por aspersión se incremente de 0.63 a 0.78, por lo que implica ahorros de agua, energía y por lo tanto en costos. Esto implica que si la productividad se mantiene o se aumenta, la productividad del suelo y del agua también aumentará.

Pérdidas parciales y globales del sistema de riego.

Las pérdidas parciales y globales se presentan en el cuadro siguiente:

Cuadro 7.32. Pérdidas de agua expresadas en lámina y con las condiciones actual y mejorado el sistema de riego.

CONCEPTO	ACTUAL (cm)	CON MEJORA (cm)	AHORRO (cm)
Pérdidas por uniformidad de lluvia (Pull)	1.67	0.54	1.13
Pérdidas por evaporación y arrastre (Peya)	1.32	0.81	0.51
Pérdidas por uniformidad de distribución hidráulica (Pudh)	0.47	0.39	0.08
Suma pérdidas (SP)	3.46	1.73	1.73
Reducción de pérdidas	1.73 cm o 50 %.		

Como se observa en el cuadro anterior, los ahorros máximos son en la uniformidad de lluvia por un traslape adecuado.

7.4. Ejemplo de cálculo de lámina de riego con datos de una evaluación en sistema de riego portátil manual

Se requiere calcular la lámina de riego por aplicar con un sistema de riego por aspersión portátil manual, con base en los resultados de una evaluación del mismo sistema de riego. También, se necesita jerarquizar las pérdidas de agua por las diferentes causas.

7.4.1. Información recabada

El sistema de riego por aspersión aprovecha un pozo de bajo gasto que bombea día y noche a un estanque, caso frecuente en la región lagunera de Coahuila y Durango. Tiene un rebombeo para operar el riego por aspersión, con conducción de tuberías de aluminio con pequeñas fugas.

7.4.2. Resultados de la evaluación

Se realizó la evaluación del sistema de riego y se presentan a continuación los resultados de la evaluación:

Eficiencia estadística – 0.820.

Eficiencia por evaporación y arrastre – 0.93.

Eficiencia de distribución hidráulica – 0.953.

Eficiencia de conducción – 0.98.

Eficiencia de almacenamiento – 0.97.

Se estimó que el requerimiento de riego fue de 6.15 cm, para intervalos de diez días.

7.4.3. Cálculos y jerarquización de problemas

Se preparó una hoja de cálculo con la secuencia de operaciones, fórmulas y datos necesarios para resolver el problema, y se obtuvo el cuadro 7.33.

De la hoja de cálculo se obtuvo que la lámina de riego por aplicar es de 8.90 centímetros.

Al comparar las pérdidas de agua, se concluyó que las correspondientes a la falta de uniformidad de lluvia son las más importantes porque son las mayores; en segundo lugar fueron las correspondientes a arrastre y evaporación; en tercer lugar se encontraron las pérdidas por falta de uniformidad de distribución hidráulica; en cuarto lugar las pérdidas por almacenamiento y, en último lugar, las pérdidas por conducción.

Cuadro 7.33. Aplicación de resultados de una evaluación para proyectar un riego eficiente con un sistema de riego por aspersión.

CONCEPTO	FÓRMULA, DATO	EFICIENCIA	LÁMINA cm	PÉRDIDAS CM
Requerimiento de riego cm	RR		6.15	
Eficiencia estadística	$1-CV$	0.820		
Lámina de riego neta (LRN)	$LRN=RR/(1-CV)$		7.50	
Pérdidas por uniformidad de lluvia (Pull)	$Pull=LRN-RR$			1.35
Eficiencia por evaporación y arrastre (Eeya)	$Eeya$	0.930		
Lámina de riego ajustada por evaporación y arrastre (LRAeya)	$LRAeya=LRN/Eeya$		8.06	
Pérdidas por evaporación y arrastre (Peya)	$Peya=LRAeya-LRN$			0.56
Eficiencia de distribución hidráulica (Eudh)	$Eudh$	0.953		
Lámina de riego ajustada por uniformidad de distribución hidráulica (LRAudh)	$LRAudh=LRAeya/Eudh$		8.46	
Pérdidas por uniformidad de distribución hidráulica (Pudh)	$Pudh=LRAudh-LRAeya$			0.40
Eficiencia de conducción (EC)	EC	0.980		
Lámina de riego nivel conducción (LRAC)	$LRAC=LRAudh/EC$		8.63	
Pérdidas de conducción (Pcond)	$Pcond=LRAC-LRAudh$			0.17
Eficiencia de almacenamiento (Ealm)	$Ealm$	0.970		
Lámina bruta (LB)	$LB=LRAC/Ealm$		8.90	
Pérdidas en almacenamiento (Palm)	$Palm=LB-LRAC$			0.27
Suma pérdidas (SP)				2.75
Eficiencia global (EG)	$EG=RR/LB$	0.69		

7.4.4. Recomendaciones

Mejorar la uniformidad de lluvia, cerrando el traslape o cambiando boquillas de los aspersores para que mejore el traslape. Regar cerca del límite inferior de la presión de operación, para que las gotas sean más grandes y se arrastre y se evapore menor cantidad de agua. Posteriormente puede pensarse en incrementar diámetros interiores de las tuberías para reducir las pérdidas de carga hidráulica.

- Agronomy series No. 11. (1967). Irrigation of agricultural Lands. American Society of agronomy. Winsconsin USA.
- Christiansen, J. E. (1942). Irrigation by sprinkling. Bull. No. 670. California Agric. Exp. Stn. Berkeley, CA.
- Clemmens A. J. and Solomon K. H. (1997). Estimation of Global Irrigation Distribution Uniformity J. Irrig. Drain Eng. 123, 454 (1997); American Society of Civil Engineers, USA.
- Ghinassi, Graziano (2008). Manual for Performance Evaluation of sprinkler and Drip Irrigation Systems. International Comission on Irrigation and Drainage. New Delhi, India.
- Karmeli, D. Peri, G. Todes, M. (1985). Irrigation systems design and operation. Oxford University Press, cape town.
- Montero J.*y otros. (1995). Recomendaciones para un adecuado diseño y manejo de los sistemas de riego por aspersion. Centro Regional de Estudios del Agua. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha, España.
- Montero, J. (2000). Análisis de la distribución del agua en sistemas de riego por aspersion estacionario: desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersion. Universidad de Castilla La Mancha, España.
- Ochoa A., L. (Sin Fecha) Métodos de medición de Agua. Serie Autodidacta de Medición de Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Comisión Nacional del Agua. México, D. F., México.
- Peña P. E. (2011). Método para evaluar el desempeño de sistemas de riego por aspersion fijos y de movimiento intermitente. Memorias del XVI Congreso Nacional de irrigación. Culiacán Sinaloa, México.
- Soil Conservation Service. Agricultural Handbook No. 82. (1956). United States Department of Agriculture. Washington DC.
- Tarjuelo Martín-Benito, J. M. (1999). El riego por aspersion y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.

