

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ÁREA INTEGRADA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO DEL PIVOTE CENTRAL DE LA FINCA
LA MÁQUINA, CHIQUIMULILLA, SANTA ROSA, EN CAÑA DE AZÚCAR Y SU
MEJORAMIENTO MEDIANTE EL REDISEÑO DE LA CARTILLA DE ASPERSIÓN,
DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS REALIZADOS PARA EL INGENIO SANTA ANA,
ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.**

JOSÉ ASDRUBAL TUCH MÉNDEZ

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ÁREA INTEGRADA

**“EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO DEL PIVOTE CENTRAL DE LA
FINCA LA MÁQUINA, CHIQUIMULILLA, SANTA ROSA, EN CAÑA DE AZÚCAR Y SU
MEJORAMIENTO MEDIANTE EL REDISEÑO DE LA CARTILLA DE ASPERSIÓN,
DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS REALIZADOS PARA EL INGENIO SANTA ANA,
ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.”**

**PRESENTADO A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE
AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

POR

JOSÉ ASDRUBAL TUCH MÉNDEZ

**EN EL ACTO DE INVESTIDURA COMO
INGENIERO AGRÓNOMO**

EN

**SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
EN EL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIADO**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RECTOR

M.A. Walter Ramiro Mazariegos Biolis

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA

DECANO	Ing. Agr. Waldemar Nufio Reyes
VOCAL I	Dr. Marvin Roberto Salguero Barahona
VOCAL II	Dra. Gricelda Lily Gutiérrez Álvarez
VOCAL III	Ing. Agr. M. A. Jorge Mario Cabrera Madrid
VOCAL IV	Bach. Carmen Arecely García Pirique
VOCAL V	P. Agr. Mynor Fernando Almengor Orenos
SECRETARIO	Ing. Agr. Walter Aroldo Reyes Sanabria

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2022

Guatemala, septiembre de 2022

Honorable Junta Directiva
Honorable Tribunal Examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala

Honorables miembros:

De conformidad con las normas establecidas por la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración, el trabajo de graduación titulado: **“EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO DEL PIVOTE CENTRAL DE LA FINCA LA MÁQUINA, CHIQUIMULILLA, SANTA ROSA, EN CAÑA DE AZÚCAR Y SU MEJORAMIENTO MEDIANTE EL REDISEÑO DE LA CARTILLA DE ASPERSIÓN, DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS REALIZADOS PARA EL INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.”** como requisito previo a optar al título de Ingeniero Agrónomo en Sistemas de Producción Agrícola, en el grado académico de Licenciado.

Esperando que el mismo llene los requisitos necesarios para su aprobación, me es grato suscribirme,

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'José Asdrubal Tuch Méndez', written in a cursive style.

JOSÉ ASDRUBAL TUCH MÉNDEZ

ACTO QUE DEDICO

A:

DIOS

Por haberme permitido culminar una etapa más en mi vida profesional. Proverbios 2:6 "Porque el Señor da la sabiduría; de sus labios brotan conocimiento e inteligencia.

**Mi padre José Tuch
Muxnay**

Por ser pilar fundamental en mi crianza y educación, mucho de lo que soy hoy se lo debo a él, que sin su esfuerzo y sacrificio no podría estar en este lugar el día de hoy. Te amo Padre.

**Mi madre Selestina
Méndez López**

Por haberme dado la vida, por ser pilar fundamental en mi crianza y educación. Gracias madre por haberme enseñado que la paciencia es la madre de todas las virtudes. Te amo Madre.

**Mis hermanos Douglas
Iban, Brenda Lizzette y
Dicla Roxanna**

Gracias por haberme enseñado a que los sueños se pueden cumplir con esfuerzo y perseverancia. Gracias por el todo el apoyo recibido en los momentos de mayor necesidad.

**Mi promoción 11-13
ENCA**

A todos ustedes promo que empezamos en este camino de la agricultura juntos, unos que empezaron antes pero estamos en todo que es el arte de alimentar al mundo.

**Mis compas, brothers
Hamilton Jiménez,
Hesler Gómez**

Empezamos esta aventura de la amistad-hermandad en el 2019 en la misma empresa, espero que nuestra amistad siga creciendo a lo largo de los años

A mis amigos

A todos mis amigos con los que he ido compartiendo a lo largo de mi vida. Dios bendiga sus vidas por nombre propio.

AGRADECIMIENTOS

A:

MI FAMILIA Por brindarme todo el apoyo emocional y moral que requerí en los momentos de mayor dificultad

MI ASESOR: ING. DAVID JUÁREZ QUIM Por su amistad y valioso aporte a la ejecución de este trabajo, por querer sacar mi mejor versión en cuanto a lo profesional se refiere.

A MI SUPERVISOR: DR. MARCO VINICIO FERNÁNDEZ Por su apoyo y experiencia que compartió conmigo en la ejecución del ejercicio profesional supervisado

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DEL INGENIO SANTA ANA Por permitirme realizar mis prácticas agrícolas en el departamento en mi camino de formación profesional

REGIÓN VII DEL INGENIO SANTA ANA Por ser el centro donde realicé la investigación y que me apoyo para brindar datos para realizar los respectivos análisis

A MIS JEFES EN INGENIO SANTA ANA: ING. ENRIQUE FONG, ING. EDGARDO QUIÑONEZ Por el apoyo brindado hacia mi crecimiento profesional.

ÍNDICE GENERAL

TÍTULO	PÁGINA
RESUMEN	XI
DIAGNÓSTICO DEL BALANCE HÍDRICO ENTRE LAS NECESIDADES DE LOS SISTEMAS DE RIEGO DE LA ADMINISTRACIÓN DE LA REGIÓN VII Y LAS FUENTES Y CAUDALES QUE PROVEEN EL RECURSO	1
1.1 PRESENTACIÓN	3
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 General	4
1.2.2 Específicos	4
1.3 METODOLOGÍA	5
1.3.1 Cuantificación de las entradas de agua a los sistemas de riego	5
1.3.2 Cuantificación de las salidas de agua de los sistemas de riego	6
1.3.3 Determinación de la problemática existente en la Región VII	7
1.3.4 Jerarquización de la problemática existente en la Región VII	8
1.4 RESULTADOS	9
1.4.1 Cuantificación de las entradas de agua a los sistemas de riego	9
1.4.2 Cuantificación de las salidas de agua de los sistemas de riego	12
1.4.3 Balance entre las entradas y salidas de agua a los sistemas de riego de la región VII	14
1.4.4 Determinación la problemática existente en la Región VII.	14
1.4.5 Jerarquización la problemática existente en la Región VII	21
1.5 CONCLUSIONES	23
1.6 RECOMENDACIONES	25
1.7 BIBLIOGRAFÍA	26
1.8 ANEXOS	27

TÍTULO	PÁGINA
EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO DEL PIVOTE CENTRAL 4 DE LA FINCA LA MÁQUINA, CHIQUIMULILLA, SANTA ROSA, EN CAÑA DE AZÚCAR Y SU MEJORAMIENTO MEDIANTE EL REDISEÑO DE LA CARTILLA DE ASPERSIÓN	29
2.1 PRESENTACIÓN.....	31
2.2 MARCO TEÓRICO	33
2.2.1 Marco conceptual.....	33
2.2.2 Marco referencial	65
2.3 OBJETIVOS.....	70
2.3.1 Objetivo general.....	70
2.3.2 Objetivos específicos	70
2.4 METODOLOGÍA	71
2.4.1 Determinación del estado actual de uniformidad de riego del pivote central	71
2.4.2 Mejoramiento de la uniformidad de riego mediante el rediseño de la cartilla de aspersión del pivote y la sistematización de los cálculos en una hoja electrónica.....	80
2.4.3 Evaluación de la uniformidad de riego final después de la reubicación adecuada de boquillas del pivote central según la cartilla de aspersión	96
2.4.4 Determinación de las láminas de riego requeridas por el cultivo y su comparación con las aplicadas durante la temporada de riego	97
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	102
2.5.1 Estado inicial de uniformidad de riego del pivote central.....	102
2.5.2 Cartilla de Aspersión rediseñada para el pivote central	106
2.5.3 Evaluación de la uniformidad de riego final después de la reubicación adecuada de boquillas del pivote central según rediseño de la cartilla de aspersión.....	115

TÍTULO**PÁGINA**

2.5.4	Láminas de riego requeridas por el cultivo y su comparación con las aplicadas durante la temporada de riego.....	121
2.6	CONCLUSIONES.....	133
2.7	RECOMENDACIONES	135
2.8	BIBLIOGRAFÍA	136
2.9	ANEXOS	140
SERVICIOS REALIZADOS EN APOYO A LAS ACTIVIDADES DE RIEGO DE LA REGIÓN VII DEL INGENIO SANTA ANA, CHIQUIMULILLA, SANTA ROSA.		
3.1	PRESENTACIÓN	161
3.2	ÁREA DE INFLUENCIA	162
3.3	OBJETIVOS GENERALES	163
3.4	SERVICIOS PRESTADOS.....	163
3.4.1	SUPERVISION DEL RIEGO EN LA REGIÓN VII	163
3.4.2	DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE RIEGO PARA LA REGIÓN VII.....	176
3.4.3	MONITOREO DE LA HUMEDAD CON LA Sonda TDR.....	187
3.5	BIBLIOGRAFÍA	206

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 1. Aforo a las entradas de agua a los sistemas de riego del Ingenio.....	6
Figura 2. Árbol del problema: jornada de riego efectiva de 15 horas.....	15
Figura 5. Árbol del problema: Baja eficiencia de conducción en canales de distribución.	20
Figura 6A. Mapa de la red de distribución de agua de la Región VII del Ingenio Santa Ana.	27
Figura 7. Análisis cualitativo de la respuesta de la caña de azúcar a la aplicación del agua a través del riego en la zona cañera guatemalteca.	34
Figura 8. Forma de operación del pivote central.....	36
Figura 9. Tipos de pivote: fijo, móvil y avance frontal.	37
Figura 10. Componentes del pivote central.....	38
Figura 11. Componentes del voladizo del pivote.	39
Figura 12. Componentes del aspersor de riego en el pivote.....	40
Figura 13. La uniformidad alcanzada después de un riego.....	44
Figura 14. Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el período de crecimiento de un cultivo anual.	52
Figura 15. Rangos típicos esperados del valor de k_c para las cuatro etapas de crecimiento.	54
Figura 16. Relación entre el espaciamiento, altura y ángulo de descarga de los aspersores con sus boquillas respectivas.	59
Figura 17. Área de cobertura de un aspersor en el pivote central.	61
Figura 18. Plano de localización del proyecto.....	66
Figura 19. Distribución de pluviómetros a lo largo de la tubería lateral del pivote.	72
Figura 20. Distribución de láminas obtenidas en la evaluación inicial de la uniformidad.....	104
Figura 21. Distribución de láminas en la evaluación final de la uniformidad.	116
Figura 22. Comparación de distribución de láminas en la evaluación inicial y final de la uniformidad.	118

FIGURA**PÁGINA**

Figura 23. Comparación del coeficiente de uniformidad y la uniformidad de distribución antes y después del rediseño.	119
Figura 24. Comparación de las áreas regadas adecuadamente, excesivamente e insuficientemente antes y después del rediseño.	120
Figura 25. Curva de kc para el cultivo de caña de azúcar.	122
Figura 26. Evapotranspiración de referencia para la zona en estudio en la temporada de riego.	123
Figura 27. Balance hídrico entre evapotranspiración de referencia (Eto) y la precipitación (PP) en el área de estudio.	124
Figura 28. Evapotranspiración de cultivo equivalente a la lámina neta requerida del cultivo de caña de azúcar.	129
Figura 29A. Evaluación de la uniformidad inicial para el pivote.	142
Figura 30A. Pivote central de finca La Máquina en estudio, Chiquimulilla, Santa Rosa.	142
Figura 31A. Curva de desempeño motor John Deere 4024TF270.	143
Figura 32A. Curva de desempeño bomba Hidromac AZ 4X5X11A.	144
Figura 33A. Preparativos para la instalación de los cambios propuestos en el pivote central.	146
Figura 34A. Instalación de la nueva cartilla de aspersión al pivote central.	146
Figura 35A. Evaluación de la uniformidad de riego final en el pivote central.	147
Figura 36A. Caudalímetro de tubo para determinación del hidromódulo del pivote.	147
Figura 37A. Inicio de RECAASPICE.	149
Figura 38A. Resultados del diseño agronómico en RECAASPICE.	150
Figura 39A. Cálculo del hidromódulo de trabajo en RECAASPICE.	151
Figura 40A. Cálculo de la lámina aplicada considerando el área y el hidromódulo del pivote en RECAASPICE.	152
Figura 41A. Espaciamiento de aspersores en la tubería lateral del pivote central en RECAASPICE.	153

FIGURA	PÁGINA
Figura 42A. Cálculo del caudal requerido y selección de la boquilla idónea en cada punto del pivote en RECAASPICE.	154
Figura 43A. Evaluación de la uniformidad esperada en RECAASPICE.....	155
Figura 44A. Determinación de las presiones de trabajo en RECAASPICE.....	156
Figura 45A. Resumen del rediseño de la cartilla de aspersión en RECAASPICE.	157
Figura 46. Bloques de riego de la región VII del ingenio Santa Ana.	162
Figura 47. Supervisión de riego por aspersión.....	166
Figura 49. Supervisión del riego en Ingenio.....	175
Figura 50. Supervisión en el traslado de la motobomba para riego desde casco finca.	175
Figura 51. Visita de campo para cálculo de diseño agronómico.	179
Figura 52. Fase de gabinete en el diseño de riego.	180
Figura 53. Trazo de campo para el diseño de riego de la motobomba 294-0062 correspondiente al bloque de riego uno.	183
Figura 54. Constancias del diseño de riego realizado.	186
Figura 55. Implementación del diseño de riego en finca.....	187
Figura 56. Imágenes satelitales NWI y MSI.	190
Figura 57. Introducción de la sonda al punto seleccionado.	191
Figura 58. Pantalla principal y mandos de la sonda de humedad tdr-350.	191
Figura 59. Pantalla principal del sistema del ingenio donde se ingresa la información del TDR.....	194
Figura 60. Informe generado en el sistema del ingenio para el monitoreo de humedad con sonda tdr. A: muestra los resultados del registro de humedad; la B, muestra de manera gráfica la humedad y así mismo los puntos donde se tomó el muestreo.	195
Figura 61. Constancia del monitoreo de humedad con sonda TDR.....	204
Figura 62. Monitoreo de la humedad con tdr.	205
Figura 63. Comprobación al tacto durante el monitoreo de humedad con tdr.....	205

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	PÁGINA
Cuadro 1. Fuentes de agua existentes para la Región VII.	9
Cuadro 2. Datos de aforo a deriva por el método del molinete.	9
Cuadro 3. Datos técnicos de pruebas de bombeo realizadas a pozo.	10
Cuadro 4. Caudal total disponible para la Región VII.	11
Cuadro 5. Caudal requerido para satisfacer la demanda del cultivo de Caña de Azúcar en la Región VII.	12
Cuadro 6. Caudales de agua según equipos de bombeo para la zafra 2018-19.	13
Cuadro 7. Balance entre salidas y entradas de caudal a los sistemas de riego de la región.	14
Cuadro 8. Matriz participativa para la jerarquización de la problemática encontrada en la Región VII.	21
Cuadro 9. Ejemplo de cartilla de aspersión del pivote central.	43
Cuadro 10. Criterios de calidad de riego según Cuh.	47
Cuadro 11. Velocidad media en tuberías que origina diseños más económicos.	57
Cuadro 12. Coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams.	58
Cuadro 13. Caracterización del equipo de bombeo y la cartilla de aspersión del pivote.	67
Cuadro 14. Construcción cuadro para coeficiente de uniformidad.	75
Cuadro 15. Construcción de cuadro para uniformidad de distribución.	77
Cuadro 16. Cálculo de áreas regadas según calidad.	78
Cuadro 17. Láminas de riego del pivote central.	87
Cuadro 18. Cálculo del coeficiente de variación.	88
Cuadro 19. Cálculo de diseño de boquilla.	90
Cuadro 20. Segmento de catálogo de boquilla Nelson.	91
Cuadro 21. Selección de la boquilla en hoja electrónica.	95
Cuadro 22. Datos de la estación meteorológica “La Máquina”, del Instituto de Cambio Climático (ICC).	98
Cuadro 23. Valores de kc según etapa fenológica en el cultivo de caña de azúcar.	99

CUADRO	PÁGINA
Cuadro 24. Condiciones operativas durante la evaluación inicial de la uniformidad del equipo.....	102
Cuadro 25. Evaluadores de la calidad de riego determinados en el pivote.....	105
Cuadro 26. Resumen del rediseño del pivote central a velocidad máxima del 100 %.....	107
Cuadro 27. Uniformidad de riego esperada en el pivote después del rediseño.	108
Cuadro 28. Láminas de riego y tiempos de rotación del pivote central a diferentes velocidades porcentuales después del rediseño.	109
Cuadro 29. Distribución de aspersores, boquillas, reguladores de presión de la cartilla de aspersión en el pivote según rediseño.....	111
Cuadro 30. Condiciones de operación durante la evaluación final de la uniformidad de riego.	115
Cuadro 31. Resultados de la evaluación final de la uniformidad de riego.....	117
Cuadro 32. Duración de la temporada de riego.	121
Cuadro 33. Resumen del balance hídrico de evapotranspiración de referencia y precipitación.....	124
Cuadro 34. Resultados de la evapotranspiración de referencia (ET _o) y evapotranspiración del cultivo (ET _c) para la temporada de riego del 13/12/2019 al 17/05/2020 comprendiendo un total de 156 días.	125
Cuadro 35. Análisis de la evapotranspiración de referencia de la zona en estudio.	128
Cuadro 36. Resumen de las láminas requeridas de riego en los 156 días de temporada de riego.....	130
Cuadro 37. Láminas aplicadas según etapa fenológica en la temporada de riego.	131
Cuadro 38. Láminas aplicadas y requeridas durante la temporada de riego.	131
Cuadro 39A. Lámina recogida en los pluviómetros en las evaluaciones inicial y final de uniformidad de riego.	140
Cuadro 40A. Análisis comparativo de la uniformidad de riego del Ingenio Santa Ana durante la zafra 2016-17.	141
Cuadro 41A. Catálogo marca Nelson de boquillas para aspersores del pivote.	145
Cuadro 42A. Catálogo de diámetros de tubería para pivotes de marca Reinke.	148

CUADRO	PÁGINA
Cuadro 43. Distribución de la nota de la auditoria de riego en equipos de bombeo.....	167
Cuadro 44. Resumen de la supervisión de riego de la semana uno evaluada con dos equipos operando.....	169
Cuadro 45. Resumen de la supervisión de riego de la semana dos evaluada con cuatro equipos operando.	169
Cuadro 46. Resumen de la supervisión de riego de la semana tres evaluada con 17 equipos operando.	170
Cuadro 47. Resumen de la supervisión de riego de la semana cuatro evaluada con 23 equipos operando.	171
Cuadro 48. Resumen de la supervisión de riego de la semana cinco evaluada con 31 equipos operando.	171
Cuadro 49. Resumen de resultados de supervisión en cinco semanas evaluadas.	172
Cuadro 50. Descripción de los bloques de riego diseñados para la Región VII del ingenio Santa Ana.	181
Cuadro 51. Calendario de riego para el diseño de la motobomba 294-0062 correspondiente al bloque uno de riego.	182
Cuadro 52. Parámetros hidráulicos de operación de la motobomba 294-0062 para el bloque de riego uno	184
Cuadro 53. Formato de guardado de información generada por la sonda TDR en el archivo csv de Excel.....	192
Cuadro 54. Formato de la base de datos de resultados generada para subir al sistema.	194
Cuadro 55. Resultados del monitoreo de humedad con la sonda TDR durante la zafra 2018-19.	196
Cuadro 56. Área monitoreada (en hectáreas) semanalmente durante la temporada de zafra 2018-19	200
Cuadro 57. Áreas monitoreadas de acuerdo a su nivel de humedad.....	201

CUADRO	PÁGINA
Cuadro 58. Número de pantes (lotes de producción) monitoreadas semanalmente durante la temporada de zafra 2018-19.....	202

EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO DEL PIVOTE CENTRAL DE LA FINCA LA MÁQUINA, CHIQUIMULILLA, SANTA ROSA, EN CAÑA DE AZÚCAR Y SU MEJORAMIENTO MEDIANTE EL REDISEÑO DE LA CARTILLA DE ASPERSIÓN, DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS PRESTADOS EN EL INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.

RESUMEN

El presente documento es la integración del trabajo de graduación de las actividades que fueron realizadas durante el Ejercicio Profesional Supervisado (EPS). Las actividades se realizaron para el Departamento de Ingeniería Agrícola del Ingenio Santa Ana, en apoyo a la Región VII ubicada en el municipio de Chiquimulilla, Santa Rosa. El trabajo comprende tres capítulos, siendo el primero un diagnóstico realizado en la Región VII conociendo el balance hídrico entre las necesidades de los sistemas de riego y fuentes y caudales que proveen el recurso. En el segundo capítulo se presenta la investigación titulada “Evaluación de la uniformidad de riego del pivote central de la finca La Máquina en caña de azúcar y su mejoramiento mediante el rediseño de cartilla de aspersión”, como tercer y último capítulo se presentan los servicios profesionales prestados para el ingenio.

El Capítulo I consta de un balance hídrico de los sistemas de riego de la Región VII que determinó el caudal para satisfacer el requerimiento hídrico del cultivo de caña, siendo este de $4.11 \text{ m}^3/\text{s}$; sin embargo están siendo aplicados $1.82 \text{ m}^3/\text{s}$ por medio de los sistemas de riego. La capacidad de las bombas utilizadas es de $2.43 \text{ m}^3/\text{s}$, no obstante no se llega a dicha cantidad por la falta de tubería y accesorios que permitan utilizar el máximo potencial. Se identificaron cuatro problemas, el primero fue que una jornada de riego efectiva de 15 h/día, el segundo fue una fluctuación de caudal en la fuente principal de $1.89 \text{ m}^3/\text{s}$ en un período de 8 h, el tercer fue la falta de accesorios en los equipos de riego y el cuarto fue una baja eficiencia de conducción en los canales de distribución.

El Capítulo II, presenta los resultados de la investigación efectuados en el pivote central de la finca La Máquina. La investigación consistió en realizar una evaluación de riego inicial

obteniendo una baja calidad de riego apoyado por los evaluadores de Coeficiente de Uniformidad (CU) de 62.41%, Uniformidad de Distribución (UD) del 54.71 %, un Área regada Adecuadamente (ARA) de 32.23 %, Área Regada Excesivamente (ARE) de 28.75 % y Área Regada Insuficientemente (ARI) de 39.02 %. A partir de la evaluación inicial se determinó que los resultados correspondían a un mal diseño de la cartilla de aspersión del pivote, por lo que se realizó un estudio exhaustivo de los fundamentos de diseño de las cartillas.

Con el estudio de fundamentos de diseño se sintetizaron los cálculos en una hoja electrónica y se rediseñó la cartilla del pivote, probando los resultados del rediseño en una evaluación final de campo que dio un 81.93 % de CU, 74.18 % de UD, 63.65 % de ARA, 18.33 % de ARI y 18.02 % de ARI, Concluyendo que si mejoró la uniformidad de riego del pivote.

Como parte final de la investigación se evaluaron las láminas requeridas de la caña en la temporada de riego comprendida del 13 de diciembre 2019 al 17 mayo 2020, siendo un total de 635 mm y se aplicaron 214 mm dando como resultado un factor K de 0.34 indicando que se aplicó únicamente el 34% de los requerimientos del cultivo, siendo esta deficiencia generada por falta de agua en las fuentes de abastecimiento y una asignación extra de posiciones de riego característicos del pivote central.

En el Capítulo III consta el informe de servicios profesionales prestados al ingenio. El primero fue la supervisión en campo de los sistemas de riego de la Región VII, realizado por medio de auditorías de campo. Las auditorías de campo consistieron en la revisión en base a parámetros de riego (radio de mojado del aspersor, lámina de riego, profundidad de mojado), parámetros hidráulicos (presión en el aspersor, presión en la bomba) y parámetros mecánicos del motor (revoluciones por minuto, consumo de combustible). La auditoría se realizó asignando una evaluación de 0 a 100 puntos sobre el desempeño según parámetros.

El segundo servicio fue realizar el diseño de riego de nueve bloques correspondientes a un área de 836.68 ha, determinando las láminas de riego, frecuencias de riego, tiempos de riego y presión de operación en los equipos de bombeo. Así mismo se realizaron los planos respectivos entregados a finca para su instalación y operación en campo.

Como tercer servicio se realizó el monitoreo de humedad por medio de la sonda TDR que sirvió como base para la toma de decisiones de regar o no regar según el contenido de humedad. El monitoreo constó de dos fases, una de campo y una de gabinete. En la fase de campo, el TDR midió in situ el contenido de humedad dando el resultado en porcentaje volumétrico de agua. Con las lecturas in situ se procedió a realizar el análisis a través del sistema informático del ingenio para la elaboración de informes.

The seal of the Academia Coahuilense de Letras y Artes is a circular emblem. It features a central shield with a blue background. Inside the shield, there is a figure of a person in a red robe and a crown, holding a staff. Above the figure is a golden crown. To the left of the figure is a golden castle tower, and to the right is a golden lion rampant. Below the figure are two green hills. The shield is surrounded by a grey border containing the Latin text "ACADEMIA COAHUILIENSIS INTER CETERAS URBIS CONSPICUA CAROLINA".

CAPÍTULO I

**DIAGNÓSTICO DEL BALANCE HÍDRICO ENTRE LAS NECESIDADES DE LOS
SISTEMAS DE RIEGO DE LA ADMINISTRACIÓN DE LA REGIÓN VII Y LAS FUENTES Y
CAUDALES QUE PROVEEN EL RECURSO .**

1.1 PRESENTACIÓN

La situación del riego en el Ingenio Santa Ana, está siendo afecta por la escasez de agua. En la Región VII, existe falta de información respecto a las necesidades de agua reales de acuerdo a los diferentes sistemas de riego empleados y las cantidades que se ofrecen por las distintas fuentes que puedan existir. Por lo que en búsqueda de dicha información se planteó realizar un balance hídrico entre requerimientos y disponibilidad. Las necesidades de caudal partieron desde el punto de vista del cultivo y las horas regadas diarias, dando como resultado que se requieren $4.11 \text{ m}^3/\text{s}$ para satisfacer la demanda del cultivo. Sin embargo se está aplicando $1.82 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal aunque la capacidad de los equipos es de $2.43 \text{ m}^3/\text{s}$.

Existe un déficit, el cual genera una problemática. A partir de allí se detectaron los principales problemas que fueron cuatro. El primero de ellos fue que existe una jornada de riego muy baja de 15 h/día. El segundo fue que existe una gran fluctuación de caudal en la fuente principal que tiene una influencia sobre el 97 % del área total, siendo un caudal medio de $3.1 \text{ m}^3/\text{s}$, sin embargo durante el aforo de dicha fuente se pudo determinar que existen fluctuaciones de caudal del $1.89 \text{ m}^3/\text{s}$ en un período de 8 h.

El tercer problema detectado fue que los equipos de riego están siendo subutilizados, manejando un caudal de 550 gpm, siendo su capacidad de 1,020 gpm, esto provoca que no se alcancen las frecuencias de riego requeridas por el cultivo. El cuarto problema detectado fue que existe una baja eficiencia de conducción en los distintos canales, provocando que no llegue el caudal que se extrae a partir de la fuente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 General

Realizar un balance hídrico entre las necesidades de los sistemas de riego de la administración de la Región VII y las fuentes y caudales que proveen el recurso.

1.2.2 Específicos

- A. Cuantificar las entradas de agua a los sistemas de riego
- B. Cuantificar las salidas de agua de los sistemas de riego
- C. Determinar la problemática existente en la región VII.
- D. Jerarquizar la problemática existente en la región VII.

1.3 METODOLOGÍA

1.3.1 Cuantificación de las entradas de agua a los sistemas de riego

Para la cuantificación de las entradas de agua se estableció la siguiente metodología:

- A. Se realizó un recorrido por la finca para conocer la red de distribución de canales de riego.
- B. Se identificó las fuentes de agua principales que alimentan la red de distribución y determinó el área de influencia de cada fuente en hectáreas (ha). Se identificaron dos fuentes, la primera una deriva del río Los Esclavos, la segunda un pozo mecánico para abastecer un sistema de mini-aspersión.
- C. Se estableció un punto de aforo en la deriva principal del río Los Esclavos y se realizaron aforos para determinar el caudal de agua entrante al área de influencia, presentando el valor en metros cúbicos por segundo (m^3/s).
- D. La determinación del caudal producido en el pozo mecánico, se pidió el registro de la pruebas de bombeo realizada al pozo en mención, la información solicitada fue:
 - a. Producción máxima en galones por minuto (gpm)
 - b. Nivel estático en pies (pies)
 - c. Nivel dinámico en pies (pies)
- E. Considerando los valores de Producción Máxima (Pm), Nivel Estático (ne) y Nivel Dinámico (nd), se calculó el caudal específico de aprovechamiento del pozo, es decir:

$$Q_e = \frac{Pm}{N_e - N_d} = \frac{1400 \text{ gpm}}{75 \text{ pies} - 9 \text{ pies}} = 21.2 \text{ gpm/pie}$$
- F. Considerando un nivel de abatimiento de 66 pies, es decir la diferencia entre 75 pies de nivel dinámico y 9 pies de nivel estático, y considerando un nivel de aprovechamiento del 85 % de acuerdo a Argueta López (2009), el caudal aprovechable se determinó de la siguiente manera:

$$Qa = Qe \times Abat \times 0.85 = 21.2 \text{ gpm/pie} \times 66 \text{ pies} \times 0.85 = 1,189 \text{ gpm}$$

En la figura 1 se observa la entrada de deriva de agua utilizado para el aforo del río Los Esclavos en el estudio.



Fuente: elaboración propia, 2019.

Figura 1. Aforo a las entradas de agua a los sistemas de riego del Ingenio.

1.3.2 Cuantificación de las salidas de agua de los sistemas de riego

Para la cuantificación de salidas de agua del sistema se procedió de la siguiente manera:

- A.** Se determinó el requerimiento de caudal en base a necesidades fisiológicas del cultivo de caña de azúcar. Para esto se consideró el área a regar en hectáreas (ha), el

consumo de agua del cultivo (lámina) en milímetros por día (mm/día) y la cantidad de horas regadas por día, es decir:

$$Q = \frac{\text{Area} \times \text{lámina}}{\text{Horas regadas}} = \frac{3941 \text{ ha} \times 6.75 \text{ mm}}{18 \text{ h}} = \frac{39,410,000 \text{ m}^2 \times 0.00675 \text{ m}}{64800 \text{ s}} = 4.11 \text{ m}^3/\text{s}$$

- B.** Se realizó un inventario de la cantidad de equipos de riego según su método de riego en la finca.
- C.** Para cada equipo de riego se determinó el caudal consumido, para esto se utilizó un caudalímetro de tubo, colocado al inicio de la tubería de cada equipo que dio las lecturas en galones por minuto. La sumatoria de los caudales individuales por equipo, sería el caudal total, es decir:

$$\text{Caudal}_{\text{metodo}} = \sum_{i=1}^n \text{Caudal}_{\text{equipo}} \times \text{Cantidad Equipos}$$

- D.** Por último se realizó el balance entre entradas y salidas de caudal de agua en los sistemas a través de la siguiente expresión:

$$\text{Balance} = \text{entradas de agua} - \text{salidas de agua} = 0$$

1.3.3 Determinación de la problemática existente en la Región VII

- A.** A través del análisis de la información se realizaron arboles de problemas, estableciendo las causas y efectos de los mismos para cada problema identificado.

1.3.4 Jerarquización de la problemática existente en la Región VII

- A.** Se les asignó un valor de importancia a los distintos problemas detectados en un rango de 0 - 10. Siendo 0 poco importante y 10 muy importante.
- B.** Se pidió a los responsables directos de la problemática que califiquen de acuerdo al criterio descrito con anterioridad.
- C.** El problema que indique un mayor puntaje, será el que mayor efecto negativo tendrá en las operaciones de riego en la región VII del Ingenio Santa Ana.

1.4 RESULTADOS

1.4.1 Cuantificación de las entradas de agua a los sistemas de riego

A través del recorrido en finca se pudo identificar dos fuentes de agua que proveen del recurso a los diferentes sistemas de riego. Estos resultados se muestran a continuación.

Cuadro 1. Fuentes de agua existentes para la Región VII.

Número	Fuente	Área influencia (ha)
1	Río Los Esclavos	3,855
2	Pozo Mecánico La Sonrisa	85
Total		3,940

En el cuadro 1 se muestra las dos fuentes de agua identificadas durante el recorrido en finca. La primer fuente de agua es una deriva principal proveniente del río Los Esclavos, el cual es utilizada para regar de 3,855 ha; de allí se reparte usando la red de distribución de canales de riego para satisfacer la demanda de los sistemas de riego utilizados en el área. La segunda fuente es un pozo mecánico que abastece un sistema de riego por mini-aspersión de 85 ha. A continuación se muestran en el cuadro 2 los resultados del aforo realizado a la fuente de agua principal, siendo esta una derivación del río Los Esclavos

Cuadro 2. Datos de aforo a deriva por el método del molinete.

Aforo (hora realizado)	Caudal en m ³ /s
8:00 a. m.	4.02
10:00 a. m.	3.58
2:00 p. m.	2.45
4:00 p. m.	2.12
Promedio caudal	3.04

En el cuadro 2 se muestran los resultados obtenidos a través de un aforo hecho por el método del molinete en la deriva principal que alimenta todo el sistema de canales de

conducción de la región VII. Se hicieron 4 lecturas, empezando de las 8:00 a.m. hasta las 4:00 p.m. La primera lectura dio como resultado un caudal de $4.02 \text{ m}^3/\text{s}$ esto a las 8 am sin embargo, la última lectura fue de $2.12 \text{ m}^3/\text{s}$ a las 4 pm, resultando en una disminución de caudal de $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$, esto en un lapso de 8 h. Debido a las fluctuaciones de caudal a lo largo del día, se consideró tomar el caudal medio de las 4 evaluaciones realizadas. Determinando que , la fuente del río los Esclavos provee un caudal medio de $3.04 \text{ m}^3/\text{s}$.

A continuación se muestra los resultados obtenidos de la segunda fuente de agua identificada, siendo el pozo mecánico.

Cuadro 3. Datos técnicos de pruebas de bombeo realizadas a pozo.

Nombre del pozo	La Sonrisa
Producción máxima (gpm)	1,400
Nivel estático (pies)	9
Nivel dinámico (pies)	75
Abatimiento (pies)	66
Caudal específico (gpm/pie)	21.2
Abatimiento aprovechable (85%)	56.1
Caudal aprovechable (gpm)	1,189

El cuadro 3 muestra datos técnicos del pozo mecánico identificado. El caudal máximo fue de 1400 gpm, el nivel estático del puso fue de 9 pies, el nivel dinámico de 75 pies, haciendo un abatimiento de 66 pies, es decir la diferencia entre nivel estático y dinámico. Considerando lo anterior se obtuvo un caudal específico de 21.20 gpm/pie de abatimiento, es decir que por cada descenso en el nivel de agua en un pie, el pozo es capaz de producir 21.20 gpm. Argueta López (2009) indica que el aprovechamiento de un pozo no debe ser superior al 85 % del abatimiento, es decir para este pozo no se debe se extraer un caudal que supere los 56.10 pies en el descenso del agua, a partir de este nivel de

abatimiento, el caudal máximo aprovechable del pozo fue de 1,190 gpm, es decir $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$.

Este pozo fue adquirido con la renta de una nueva finca llamada “La Sonrisa” en el año 2018. El Ingenio Santa Ana, por medio de una negociación con el Ingenio Magdalena se hizo de esta finca. Al momento de la adquisición, se realizó una prueba de bombeo, la cual determinó la producción máxima del pozo. El autor de este diagnóstico solicitó la información generada en la prueba de bombeo para sintetizar la información en este apartado. El cuadro 4 muestra el caudal total que abastecen las fuentes de agua de la Región VII.

Cuadro 4. Caudal total disponible para la Región VII.

Fuente	Caudal m^3/s	Área (ha)
Deriva de río	3.04	3,855
Pozo Mecánico	0.07	85
Total	3.11	3,941

En cuadro 4 muestra el caudal total disponible para la región VII. Siendo un total de $3.11 \text{ m}^3/\text{s}$. No existen otras fuentes de agua, por lo que se deben buscar alternativas si se desea contar con una mayor disponibilidad del recurso.

1.4.2 Cuantificación de las salidas de agua de los sistemas de riego

La cuantificación de salidas se inició realizando el requerimiento de caudal neto según necesidades fisiológicas del cultivo de caña, presentando los resultados en el siguiente cuadro.

Cuadro 5. Caudal requerido para satisfacer la demanda del cultivo de Caña de Azúcar en la Región VII.

Requerimientos hídricos	
Área /(ha)	3,941
Lamina diaria (mm/día)	6.75
Horas regadas diarias	18
Caudal requerido (m³/s)	4.11

En el cuadro 5 se muestra el caudal requerido para cumplir la demanda de la caña de azúcar. Considerando un área de 3,941 ha, una lámina a aplicar de 6.75 mm diarios y una operación de 18 h de riego por día, el caudal requerido fue de 4.11 m³/s.

Considerando los métodos de riego de la región VII, se calculó la capacidad de riego de la finca en función de la cantidad de equipos que se tiene y el caudal por cada uno de ellos. Los resultados se muestran en el cuadro 6.

Cuadro 6. Caudales de agua según equipos de bombeo para la zafra 2018-19.

Método de riego	#Equipo	Caudal (m ³ /s)		
		Utilizado	Capacidad máxima	Diferencia
Aspersión	22	0.73	1.36	0.62
Pivote Central	3	0.24	0.24	0.00
Avance Frontal	3	0.76	0.76	0.00
Mini-aspersión	1	0.07	0.07	0.00
Total	29	1.80	2.43	0.62

El cuadro 6 muestra el caudal utilizado y caudal máximo por sistema de riego según los equipos existentes en cada uno. Para el método de riego por aspersión, la finca posee 22 equipos que en total utilizan 0.73 m³/s, sin embargo tienen una capacidad de riego de 1.36 m³/s. Para el método de pivote central se tienen 3 equipos, consumiendo 0.24 m³/s, siendo esta su capacidad máxima. Para el método de avance frontal, se utilizan 3 equipos que consumen en total 0.76 m³/s y está misma es su capacidad máxima. Por el último el método de mini-aspersión consume 0.07 m³/s siendo esta su capacidad máxima. En total la capacidad de riego de la región es de 2.43 m³/s, sin embargo actualmente se está aplicando únicamente 1.80 m³/s, haciendo una diferencia de 0.62 m³/s.

1.4.3 Balance entre las entradas y salidas de agua a los sistemas de riego de la región VII

En el cuadro 7 se presenta el balance de salidas y entradas de agua a los sistemas de riego evaluados.

Cuadro 7. Balance entre salidas y entradas de caudal a los sistemas de riego de la región.

2 Entradas totales (m ³ /s)	Salida de caudal (m ³ /s)	Balance (diferencia)	Observación
3.11	4.11	1	Requerimiento fisiológico
	1.8	-1.31	Caudal utilizado
	2.43	-0.68	Capacidad máxima de equipos

En el cuadro 7 se muestran el balance hídrico realizado. Se puede observar que el caudal total en la entrada del sistema es de 3.11 m³/s esto siendo abastecido por las dos fuentes identificadas: El Río Los Esclavos y el pozo mecánico. Considerando el requerimiento fisiológico del cultivo de 4.11 m³/s, existe una deficiencia de 1 m³/s faltante para suplir la demanda del cultivo, por lo que se puede concluir que existe falta de agua. Por otro lado, la capacidad de riego de los diferentes sistemas es de aplicar un caudal de 2.43 m³/s, sin embargo por falta de accesorios de riego únicamente aplican 1.8 m³/s.

2.1.1 Determinación la problemática existente en la Región VII.

El primer problema detectado fue la cantidad de horas regadas por día en la región, siendo presentado en el siguiente árbol de problema según la figura 2.

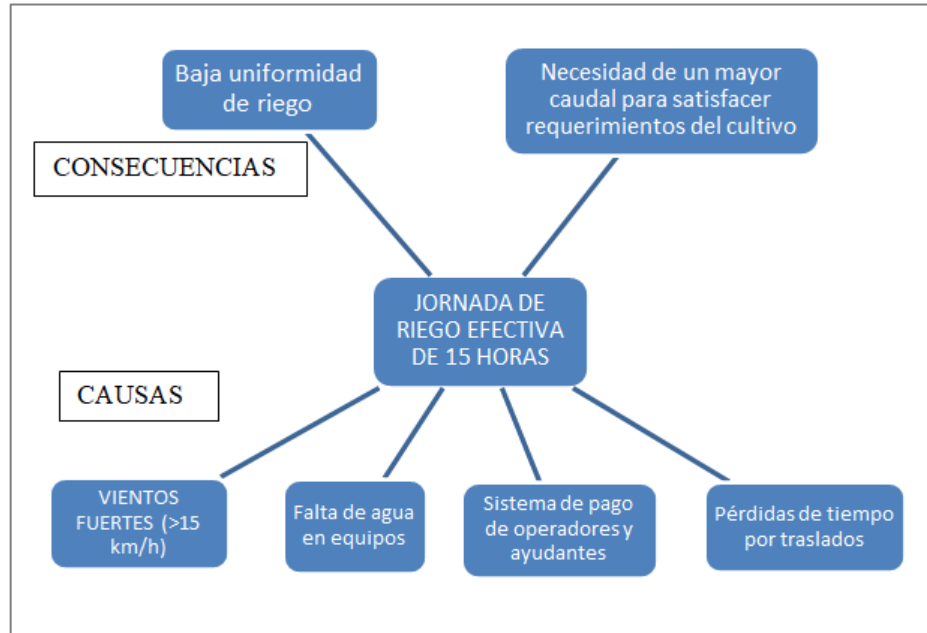


Figura 2. Árbol del problema: jornada de riego efectiva de 15 horas.

Invertir el árbol de tal manera que los efectos (consecuencias) aparezcan en la parte superior y las causas en la parte inferior (Raíz), así mismo en todos los árboles presentados.

La figura 2 muestra el árbol de problema: jornada de riego efectiva de 15 h. En términos generales este problema está directamente relacionado con la cantidad de caudal que se necesita para satisfacer la demanda del cultivo de la caña de azúcar. Si bien se conoce que para calcular el caudal se procede así:

$$Q = \frac{\text{Area} \times \text{lámina}}{\text{Horas regadas}}$$

Al disminuir las horas, se requiere un mayor caudal para cubrir el mismo requerimiento del cultivo, esto debido a que es ese lapso, se debe entregar toda el agua. Ahora bien, si se desea utilizar al máximo las fuentes de agua, se debe incrementar la cantidad de horas regadas por día.

Entre las causas de este problema se encuentra la alta velocidad de viento. Un comportamiento generalizado es que entre 10:00 am – 3:00 pm, el viento alcanza velocidades de hasta 20 km/h. Por lo que se toma como medida el apagar los equipos de riego, que de acuerdo a Cameiro et al (2017), una alta velocidad de viento repercute en una baja uniformidad de riego que según Perez et al. (2010) la baja uniformidad produce menores rendimientos a los esperados en un cultivo. Una de las alternativas es emigrar gradualmente al sistema de riego por goteo, siendo este el más efectivo al no ser afectado por el viento.

Otra de las causas de la jornada de riego de 15 h, radica en el sistema de pago de los operadores y ayudantes. A ellos se les paga por cambios realizados. Sin embargo cuando se alcanza el número máximo de cambios aceptados por el sistema (6 al día en turno de 12 h), ellos no se esfuerzan por hacer un cambio más ya que ganarían la misma cantidad. La posible solución estaría en mejorar el sistema de pago de los operadores para alcanzar una mayor eficiencia en hectáreas regadas por día.

El segundo problema detectado fue las fluctuaciones considerables de caudal en la deriva principal del río Los Esclavos.

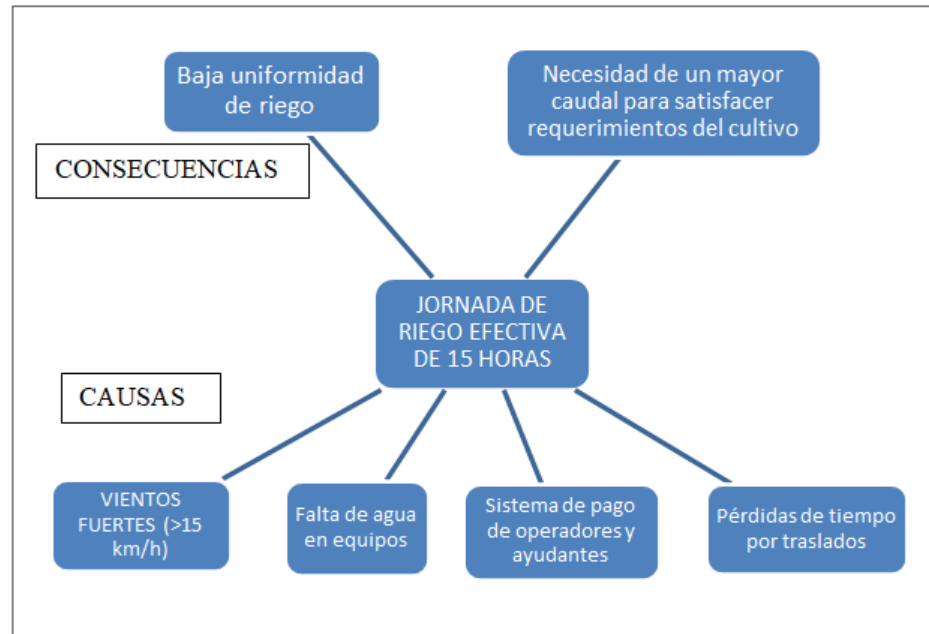


Figura 3. Árbol del problema: fluctuaciones considerables de caudal en la deriva principal del río Los Esclavos.

En la figura 3 se muestra las fluctuaciones de caudal siendo un problema muy influyente para la región VII. Dentro de las causas que lo provocan se encuentra la operación de una empresa hidroeléctrica que se encuentra río arriba. La empresa utiliza compuertas para permitir el paso de agua en la corriente del río, operando en horas de la noche. Sin embargo por la longitud de conducción desde la toma hasta nivel parcelario, el incremento de caudal en la región se da en horas de 9:00 am a 3:00 pm. Sin embargo durante este lapso el alta de velocidad de viento impide la operación de los equipos. En horas de la noche cuando el viento disminuye, el caudal brindado por el río es menor, ya que el agua ha sido detenida por las compuertas de la hidroeléctrica.

Una respuesta tentativa a la causa anterior sería poder conversarlo en una mesa técnica en el cual se expongan las contrapartes sus puntos de vista y puedan llegar a un acuerdo en el cual se establezca un cambio en el horario de operación de la empresa a fin de que llegue agua cuando el viento no afecte demasiado y se pueda regar. Sin embargo, de no llegar a un acuerdo, la construcción de reservorios sería otra alternativa, aprovechando las

horas con mayor caudal (medio día) y mayor viento, cuando los equipos paran. Por último, la perforación de pozos es otra alternativa para combatir los cambios de caudal, sin embargo, con este último la jornada de riego siempre sería de 15 h.

Otro componente causa clave son las regulaciones que hace el Instituto de Cambio Climático. Ellos hacen aforos constantes en las derivas, esto con la finalidad de mantener un control del consumo hecho por los usuarios. Establecen que en el lecho del río debe proveer un caudal no menor de 2 m³/s de lo contrario se aplicarían acciones legales en contra del Ingenio.

Por último, se tiene que en algunas ocasiones, la distribución dentro de la red canales de distribución no se realiza de la mejor manera. En algunas ocasiones, canales cuentan con agua pero no es utilizada por que no existen equipos operando en ese sector. Esto último puede ser solucionado a través de una mejor coordinación entre las personas encargadas y un sistema de monitoreo de humedad completo del área, priorizando las áreas a regar.

El tercer problema detectado fue la subutilización de equipos de riego que a continuación se describe.

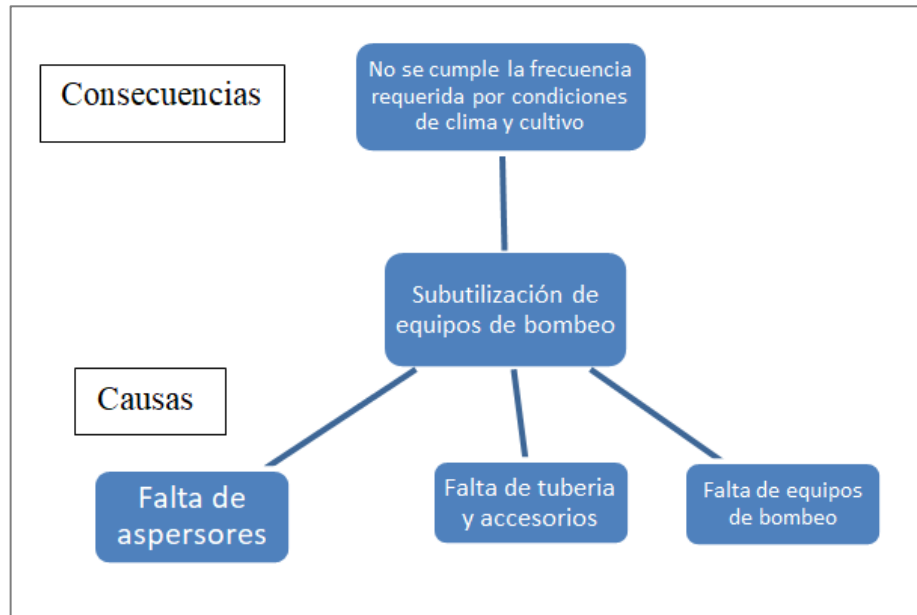


Figura 4. Árbol del problema: subutilización de equipos.

La figura 4 muestra el árbol de problema: subutilización de equipos. El requerimiento fisiológico del cultivo de caña es de $4.11 \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo con los equipos que se tienen se aplican $1.80 \text{ m}^3/\text{s}$ y la capacidad de los equipos es de $2.43 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta diferencia radica la falta de aspersores, tubería y accesorios en el método por aspersión. En el sistema de riego por aspersión cada motobomba está utilizando 550 gpm en promedio según lecturas caudalímetros. Se están utilizando 3 aspersores Komet Twin. Sin embargo las bombas pueden operar hasta con 6 aspersores simultáneamente, siempre y cuando se utilice sistema de caudal compartido (dos tuberías principales) en el diseño hidráulico del diseño de riego.

Bajo la premisa anterior, cada motobomba de aspersión estaría consumiendo 1,020 gpm. Importante para cubrir la demanda del cultivo. La consecuencia principal es el incumplimiento de la frecuencia requerida por el cultivo. Este problema puede ser solucionado con el equipamiento con accesorios a los distintos equipos de aspersión para trabajar con sistemas compartidos de 6 aspersores.

El cuarto problema detectado fue una baja eficiencia de conducción en canales de distribución.

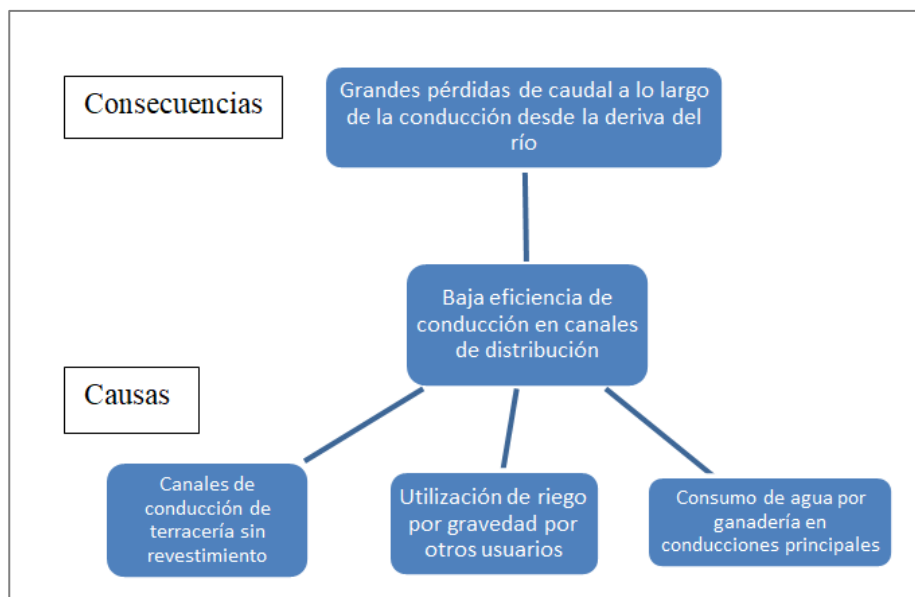


Figura 5. Árbol del problema: Baja eficiencia de conducción en canales de distribución.

En la figura 5 se muestra el árbol de problema: Baja eficiencia de conducción en canales de distribución. Si bien el caudal que ingresa a la fuente de agua es cambiante a lo largo del día por las condiciones descritas. Existe una baja eficiencia de conducción en los canales. De acuerdo a Vásquez et al. (2017), citan que en grandes sistemas (mayor de 10,000 ha) y sistemas pequeños (menor de 1,000 ha) con una comunicación deficiente y una administración menos eficaz, la eficiencia de conducción en canales principales puede oscilar entre 50 % - 70 %. Por lo que una interpolación entre las eficiencias y un área de 3,940 ha, se obtiene que existe una eficiencia del 63.50 %.

Esto se debe principalmente a que los canales están sin revestir por lo que gran cantidad de agua es perdida por infiltración y por falta de limpieza. Además se incluyen las pérdidas existentes por evaporación directa. Una posible solución radicaría en revestir canales, sin

embargo por la condición de arrendamiento actual de tierras, se recomendaría utilizar revestimiento que no sean fijos como lo sería una fundición de hormigón.

Por otro lado está que existen otros usuarios en el recorrido del agua conducida por el Ingenio Santa Ana. Otros Ingenios utilizan el agua y riegan con método de gravedad, consumiendo una gran cantidad. Actualmente no se tienen datos de la extracción real de ellos.

2.1.2 Jerarquización la problemática existente en la Región VII

En el cuadro 8 se presenta la jerarquización realizada para la problemática existente.

Cuadro 8. Matriz participativa para la jerarquización de la problemática encontrada en la Región VII.

NO.	PROBLEMA	CONSIDERACIONES SEGÚN INVOLUCRADOS										Prioridad
		MR A	CR A	CR A	CR A	MR M	M S	M C	MC M	SR	Total	
1	Jornada de Riego efectiva de 15 horas diarias	10	10	10	10	8	10	7	10	8	83	2
2	Fluctuaciones considerables de caudal en la deriva principal del Río Los Esclavos	10	10	10	10	10	10	10	10	10	90	1
3	Subutilizació de equipos de bombeo	10	5	10	10	0	10	10	8	9	72	3
4	Baja eficiencia de conducción en canales de distribución	10	5	5	10	9	5	5	5	9	63	4

PUNTUACIÓN	
Sin Prioridad	0
Máxima Prioridad	10

Referencias de los involucrados:

MRA = mayordomo de riego por aspersión

CRA = caporal de riego por aspersión

MRM = mayordomo de riego mecanizado

MS = mayordomo de siembra

MC = mayordomo de corte de semilla

MCM = mayordomo de maquinaria agrícola

SR = supervisor de región.

En el cuadro 8 se muestra la jerarquización de los problemas encontrados. Se entrevistaron a un total de 9 personas. Siendo estos los encargados de riego directo de la región, así mismo se involucró a 3 personas ajenas a la labor de riego pero que se involucran de una manera (labor de siembra, mecanización, control de malezas. A través de las distintas apreciaciones a la problemática, se pudo llegar a la conclusión que el problema que ostenta la máxima prioridad es las **fluctuaciones considerables de caudal en la deriva principal del río Los Esclavos**, obteniendo una puntuación de 90/90. El problema de segunda prioridad es la **jornada de riego efectiva de 15 h/día**, con una puntuación de 83/90. Por lo que los esfuerzos para encontrar soluciones deben estar enfocados en dicho orden.

2.2 CONCLUSIONES

1. Se identificaron dos fuentes. La primera es la deriva directa del Río Los Esclavos con un caudal de $3.04 \text{ m}^3/\text{s}$ y la segunda un pozo mecánico que abastece un caudal de $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$. En total las dos fuentes abastecen un caudal $3.11 \text{ m}^3/\text{s}$.
2. Se cuantificó la salida de agua al sistema, concluyendo que las necesidades de agua en términos de caudal según el requerimiento fisiológico de la caña fue $4.11 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo este para un área total de 3,940 ha, con una lámina diaria de 6.75 mm/día y con 18 h/día de riego, por lo que sí existe falta de agua para satisfacer el requerimiento del cultivo. Sin embargo con la cantidad de equipos y accesorios disponibles únicamente se está aplicando un caudal de $1.82 \text{ m}^3/\text{s}$, aunque la capacidad de equipos es de $2.43 \text{ m}^3/\text{s}$.
3. A través del presente estudio se detectaron 4 problemas principales. El primero fue una jornada de riego efectiva de 15 h, las causas principales son el viento (20 km/h a las 12:00 am generalmente), lo que provoca apagar equipos ya que si se sigue regando la uniformidad de riego es baja. Otra causa es el sistema de pago de los operadores y ayudantes en riego por aspersión, el sistema solo paga 6 cambios, y ellos al concluir sus cambios no están dispuestos a realizar más cambios por no ganarlos.
4. El segundo problema detectado fueron las fluctuaciones considerables de caudal en la deriva principal del río Los Esclavos, esto es causado principalmente por la operación de una empresa hidroeléctrica aguas arriba. Esto provoca que en horas cuando el viento es de baja velocidad permite la operación de los sistemas de riego por aspersión, el nivel de agua a nivel parcelario sea poca, y cuando el nivel de agua es apropiado, el viento fuerte impide la operación de los sistemas de riego actuales. Por otro lado las regulaciones del ICC afectan por disminuir el caudal ingresado a los canales de conducción en la deriva principal.

5. El tercer problema detectado fue una subutilización de los equipos de riego existentes, ya que por la disponibilidad de accesorios, están operando con un caudal de 550 gpm, lográndose a través de la utilización de 3 aspersores Komet Twin, lecturas tomadas con caudalímetros. Sin embargo la capacidad de estos equipos es de operar 6 aspersores simultáneamente siempre y cuando se utilice un sistema de caudal compartido en el componente hidráulico del diseño.
6. El cuarto problema detectado una baja eficiencia de conducción en los canales de distribución, siendo de este del 63.50 %. Esta baja eficiencia se debe a que los canales no está revestidos, ocasionando pérdidas por infiltración, falta de limpieza de canales.
7. Se priorizaron los problemas a través de puntuaciones dadas por las apreciaciones de involucrados dentro de la región y se pudo concluir que el orden de prioridad de la problemática es la siguiente: **fluctuaciones considerables de caudal en la deriva principal del río Los Esclavos, la jornada de riego efectiva de 15 h/día, subutilización de equipos de bombeo, y por último baja eficiencia de conducción en canales de distribución.**

2.3 RECOMENDACIONES

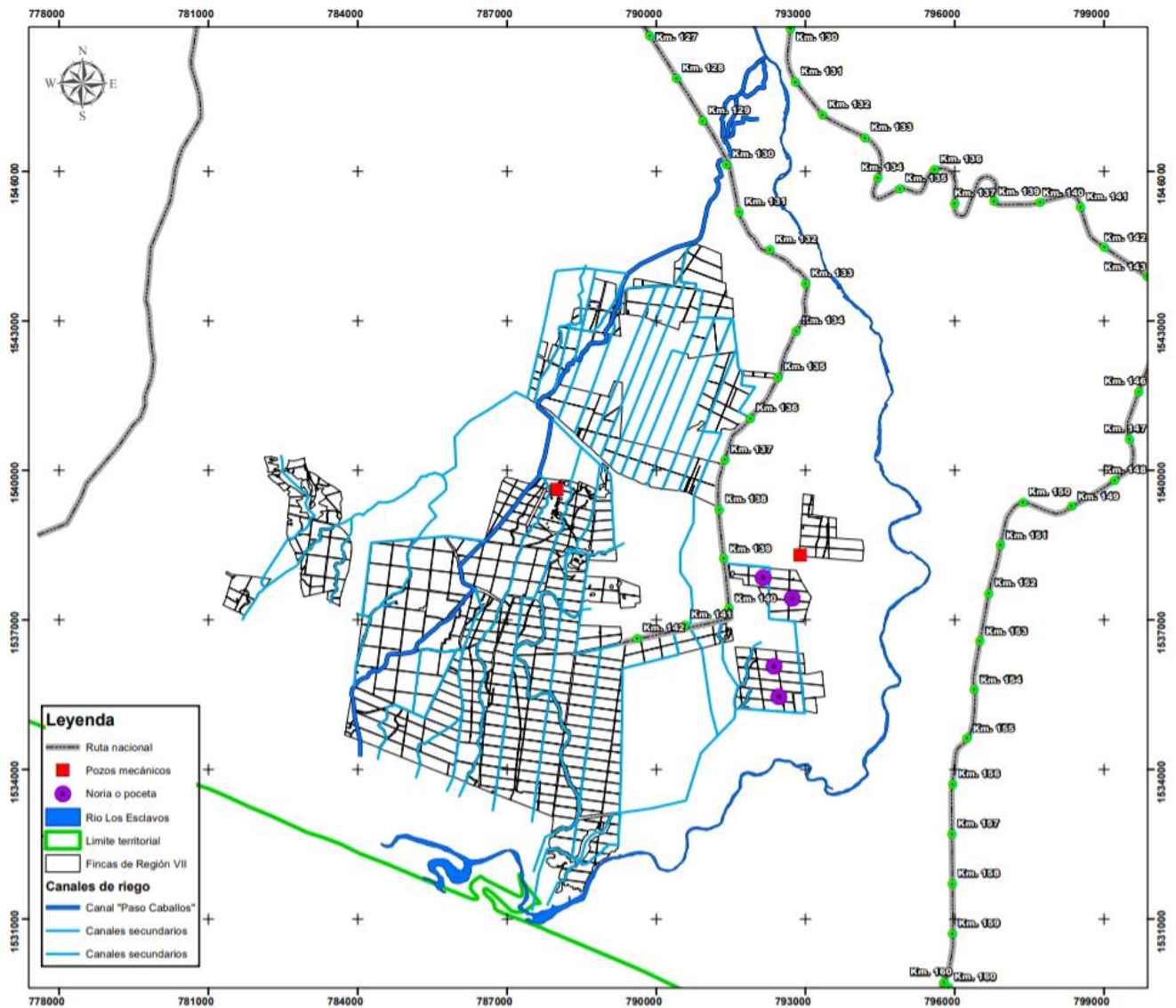
1. Para utilizar una mayor jornada de riego y combatir el efecto del viento, una de las alternativas es emigrar gradualmente al sistema de riego por goteo, siendo este el más efectivo al no ser afectado por el viento; además el agua aplicada va directamente al sistema radicular por lo que el cultivo tendría una mayor respuesta a su aplicación.
2. Para aumentar la jornada de riego otra posible solución estaría en mejorar el sistema de pago de los operadores para alcanzar una mayor eficiencia en ha regadas por día, siempre y cuando de continuar con el sistema actual de riego.
3. Las fluctuaciones de caudal podrían solucionarse tentativamente conversarlo en una mesa técnica en el cual se expongan las contrapartes sus puntos de vista y puedan llegar a un acuerdo en el cual se establezca un cambio en el horario de operación de la empresa a fin de que llegue agua cuando el viento no afecte demasiado y se pueda regar.
4. Otra solución para la fluctuación sería la construcción de reservorios, aprovechando las horas con mayor caudal (medio día) y mayor viento, cuando los equipos paran.
5. Otra alternativa sería la perforación de pozos, combatir los cambios de caudal.
6. Para la subutilización de equipos, el equipamiento con accesorios al riego por aspersión sería muy importante para abarcar mayor área cuando el viento y el agua lo permitan.
7. Para las eficiencias de conducción, una posible solución radicaría en revestir canales, sin embargo por la condición de arrendamiento actual de tierras, se recomendaría utilizar revestimiento que no sean fijos como lo sería una fundición de hormigón.

2.4 BIBLIOGRAFÍA

1. Argueta López, A. (2009). *Aprovechamiento del agua subterránea y manejo sostenible de los recursos hidráulicos en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala* [Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. 186 p.
2. Camejo Barreiro, LE; Duarte Naranjo, L; Guerra Hernández, G. (2017). Diseño agronómico en maquinas de pivote central, rendimientos, ahorro de agua y energía. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 38(2):3-16.
3. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. (2019). *Manual de medición de caudales*. Consultado 6 de marzo de 2019. <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2018/02/Manual-de-medici%C3%B3n-de-caudales-ICC.pdf>
4. Pérez Leira, R; Blanco Cruz, JL; Gómez, NP; Pérez Gil, AG. (2010). Emisores, uniformidad de riego y rendimiento agrícola en pivotes para cultivos varios. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 31(1):43-50.
5. Vásquez, A; Vásquez, I; Vásquez, C; Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de Ingeniería de Riegos*. 1ed. Lima, Perú, Universidad Agraria La Molina. 442-p.



2.5 ANEXOS



Fuente: elaboración propia, 2019.

Figura 6A. Mapa de la red de distribución de agua de la región VII del Ingenio Santa Ana.



CAPÍTULO II

EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO DEL PIVOTE CENTRAL DE LA FINCA LA MÁQUINA, CHIQUIMULILLA, SANTA ROSA, EN CAÑA DE AZÚCAR Y SU MEJORAMIENTO MEDIANTE EL REDISEÑO DE LA CARTILLA DE ASPERSIÓN

3.1 PRESENTACIÓN

Los pivotes centrales tienen el potencial de ser muy efectivos y uniformes, tal como lo afirman Martin et al (2007). Debido que la uniformidad está directamente relacionada con la rentabilidad de los cultivos, esta debe ser no menor al 88 % en cultivos con sistemas radicales superficiales de acuerdo a los lineamientos de García, citado por Tornos (2009). Para el cultivo de caña de azúcar, una baja uniformidad afecta al aplicar menores láminas en ciertos sectores de la parcela regada, conllevando a aplicar un mayor número de riegos para compensar estas deficiencias. Así también una baja uniformidad conlleva a una mayor despoblación y una baja en el rendimiento final del cultivo de caña de azúcar.

La baja uniformidad en el pivote según concluyen Pérez Leira et al (2015) es afectada en mayor medida por desperfectos técnicos y una mala distribución de aspersores con boquillas y reguladores de presión. El dimensionamiento de las boquillas y reguladores de presión deben estar especificadas en una cartilla de aspersión del pivote que inicialmente el fabricante entrega al cliente al momento de la adquisición o compra (Gaudi et al. 2007).

En la finca La Máquina, Chiquimulilla, Santa Rosa, se evaluó primeramente la uniformidad de riego de un pivote central móvil, que de manera generalizada se describió como de baja calidad; este calificativo apoyado por los resultados de la evaluación de Coeficiente de Uniformidad (CU) del 62.41 %, Uniformidad de Distribución (UD) del 54.71 %, un Área Regada Adecuadamente (ARA) de 32.23 %, Área Regada Excesivamente (ARE) de 28.75 % y Área Regada Insuficientemente (ARI) de 39.02 %. Analizando la distribución de láminas en función de la distancia del pivote, se llegó a determinar una mala distribución de aspersores, y mal dimensionamiento de boquillas y reguladores de presión, en otras palabras un mal diseño de la cartilla de aspersión.

Por lo anterior, se realizó una investigación de los fundamentos de diseño de una cartilla de aspersión, dichos fundamentos fueron una colección de criterios de diferentes autores que se sistematizaron en una hoja electrónica que se nombró como “RECAASPICE” en alusión a las primeras dos letras de cada palabra del enunciado: “**Rediseño de cartillas de aspersión en pivote central**”. Haciendo uso de la hoja electrónica se rediseñó la cartilla de

aspersión del pivote en evaluación, haciendo cambios tanto en distribución de aspersores y dimensionamiento de boquillas y reguladores de presión.

Habiendo rediseñado la cartilla de aspersión, se compraron los materiales necesarios y se llevaron a cabo los trabajos operativos en el pivote requeridos por el rediseño. Inmediatamente después, se evaluó la uniformidad de riego final en el pivote, obteniendo valores finales del 81.93 % de CU, 74.18 % de UD, 63.65 % de ARA, 18.33 % de ARI y 18.02 % de ARI. Comparando la evaluación inicial y final, los resultados sí mostraron una mejora considerable, sin embargo no se alcanzaron los valores teóricos esperados por problemas en el motor de abastecimiento del pivote que no brindó la presión necesaria requerida según rediseño.

Finalmente, se analizó la operación del riego para el cultivo de caña de azúcar a través del pivote central para una temporada de riego de 156 días comprendidas entre el 13 dic 2019 y 17 mayo 2020. El pivote en estudio es de tipo móvil con una longitud de 233 m. Se determinó que para dicho período la lámina de riego requerida por el cultivo de caña fue de 635 mm y únicamente se aplicaron 214 mm dando como resultado un factor K de 0.34, es decir que se aplicó únicamente el 34 % de la lámina requerida, esto debido principalmente a una asignación extra de posiciones de riego que son característicos de un pivote central móvil, así también, una escasez de agua generalizada en la fuente de abastecimiento.

3.2 MARCO TEÓRICO

3.2.1 Marco conceptual

A. El riego en caña de azúcar

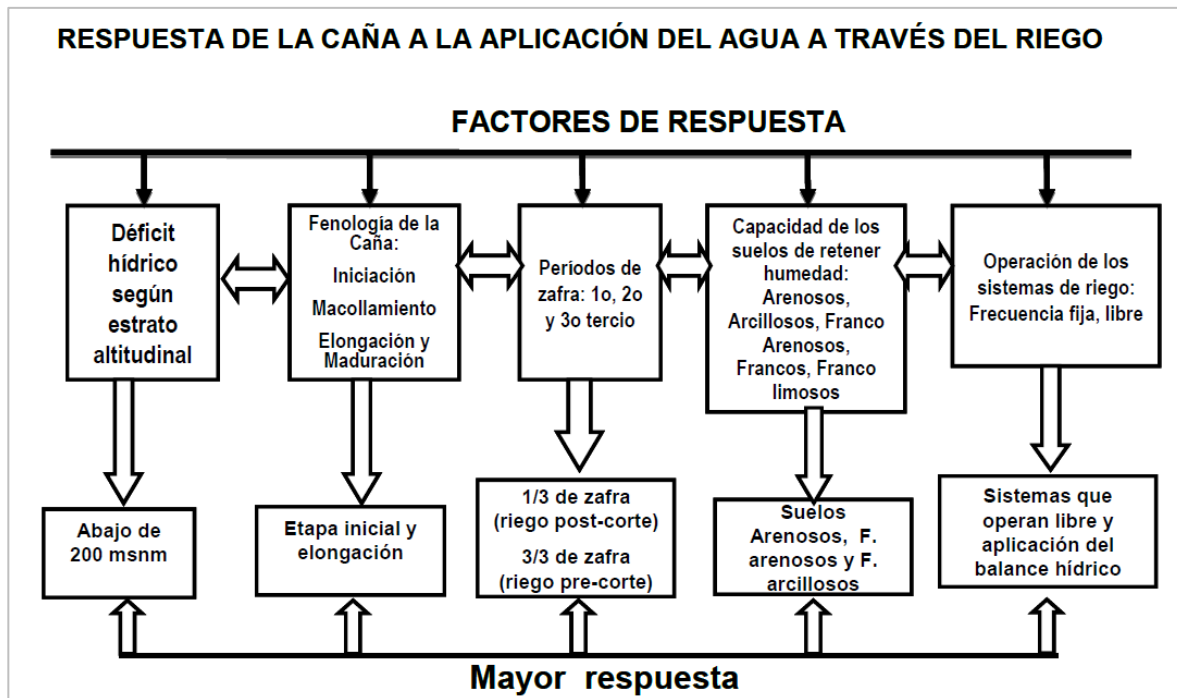
El riego es una labor que se aplica en el cultivo de caña de azúcar, generando incrementos en promedio de 20 T de caña por hectárea en relación a no regar (Castro, 2018). Según Vásquez et al. (2017) el riego tiene entre sus objetivos lo siguiente:

Aplicar únicamente agua a la zona de raíces, ya que a partir de allí no se logra un aprovechamiento del recurso; realizar un lavado de sales por el uso excesivo de fertilizantes; crear el microclima necesario para el desarrollo del cultivo; suministrar el agua que induzca reacciones de tipo fisiológico como lo es la floración, concentración de azúcares; entre otras.

En la zona cañera guatemalteca la aplicación de riego o temporada de riego se realiza entre el 15 de noviembre al 15 de mayo, que es el período seco entre años que coincide con la cosecha de la caña (período de zafra). La labor de riego tiene como objetivos específicos en la caña de azúcar; asegurar la población inicial de la caña e incrementar el peso de los tallos, para tal fin se realizan riegos post-corte o siembra y pre-corte para cada una de las etapas fenológicas tipificadas por sus necesidades hídricas (CENGICAN 2012).

Las condiciones en que se maneja el cultivo de caña en la costa Sur de Guatemala son muy heterogéneas; diferentes suelos, el clima propicia varios comportamientos de déficit hídrico; lo anterior genera una respuesta de la caña al riego variante. Según la experiencia obtenida desde 1994 (figura 7) en trabajos de investigación de tipo experimental, parcelas de validación y observaciones en campo, indican que la respuesta de la caña a la aplicación de agua a través del riego difiere según los factores; estrato altitudinal,

fenología de la caña, períodos de zafra, capacidad de los suelos de retener humedad y forma de operar los sistemas de riego (CENGICAÑA 2012).



Fuente: tomado de CENGICAÑA (2012).

Figura 7. Análisis cualitativo de la respuesta de la caña de azúcar a la aplicación del agua a través del riego en la zona cañera guatemalteca.

B. El sistema de riego por pivote central

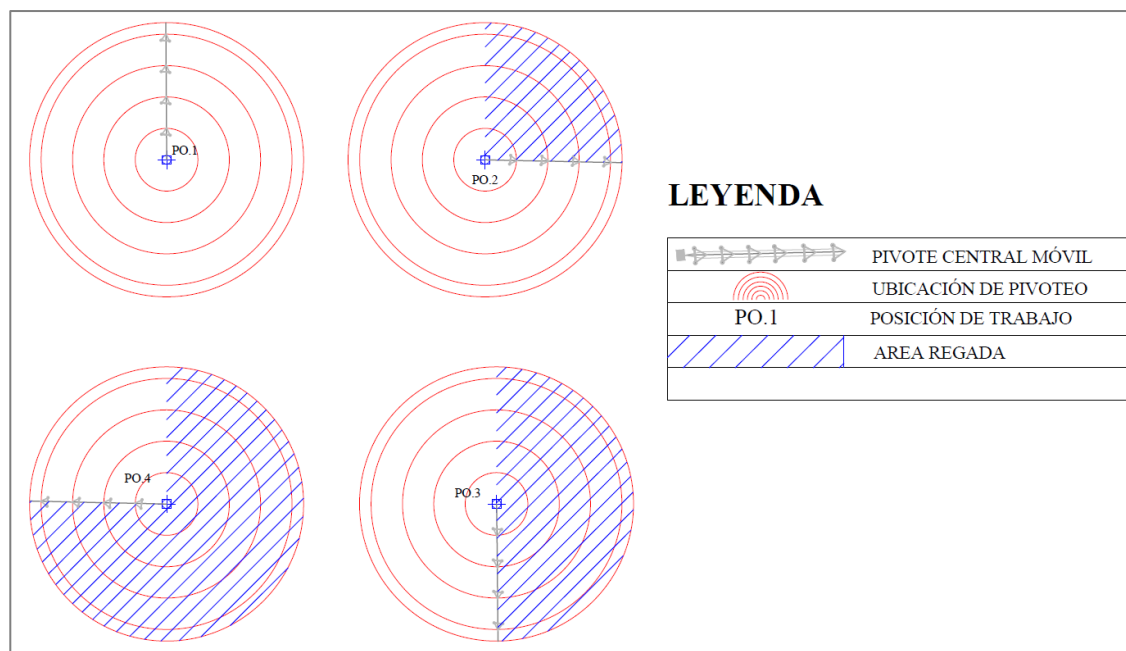
Es uno de los métodos empleados en la actualidad para la aplicación del riego. Definido por Chu (1980), como un sistema de riego consistente en una serie de tuberías con aspersores conectados y sujetos por unos marcos de acero (torres) que se desplazan sobre un punto fijo llamado pivote. Tarjuelo, citado por Moreno Ramírez (2016) se refiere a él como ramales auto-desplazables donde el agua se aplica a través de emisores localizados sobre o bajo una tubería elevada soportada por torres de conducción.

El pivote central se ha perfilado como uno de los sistemas más populares utilizados, evidenciándose con el 29 % del área total cultivable de los Estados Unidos. Para el caso de la zona cañera guatemalteca, este sistema es el que más se ha ajustado a las exigencias del campo, gracias a su versatilidad en el riego post-corte y pre-corte, llegando a ocupar el 11.50 % del total de área sembrada durante la zafra 2014-15 (Castro 2015).

Esta versatilidad radica en la aplicación de diferentes láminas de riego acorde al requerimiento del cultivo según su etapa fenológica, sin incurrir en aspectos de otra índole como lo hacen otros métodos de riego en el caso del esfuerzo físico realizado por el personal operativo.

C. Forma de operación de los pivotes centrales

El pivote basa su operación en desplazar tuberías conectadas en forma de ramal auto desplazable sobre un punto fijo llamado punto pivote o base del pivote, aplicando agua durante su recorrido formándose un área bajo riego de forma circular, así como se muestra en la figura 8; debido a que el equipo siempre se encuentra descargando el mismo caudal, las variaciones de lámina dependerán directamente de la velocidad con la que pase el pivote sobre un punto específico del terreno, a esta velocidad se le conoce como velocidad porcentual (es decir a mayor velocidad porcentual, menor lámina aplicada) y es la clave para la aplicación de diferentes láminas requeridas por el cultivo de caña en el riego pre-corte y post-corte, siendo así como se logra la versatilidad de operación del equipo (Ramírez 2018).



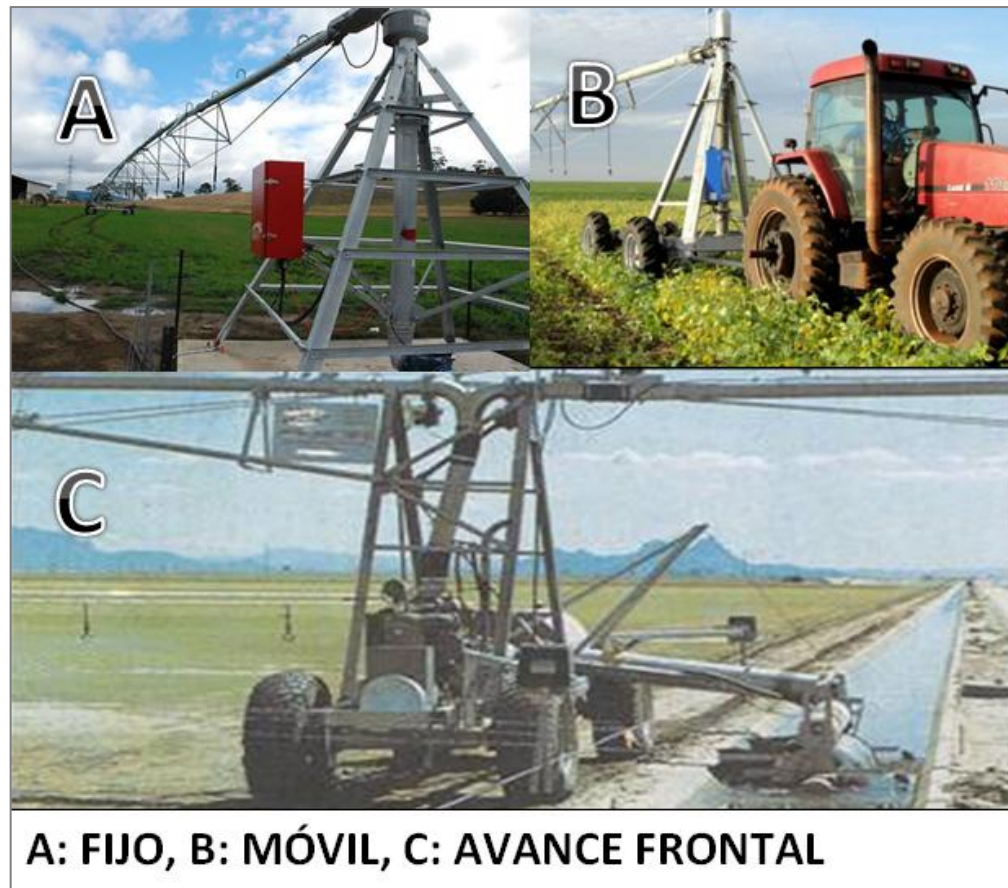
Fuente: elaborado con base en Chu (1980).

Figura 8. Forma de operación del pivote central.

D. Tipos de pivotes

Básicamente existen tres tipos de pivotes; el fijo, el móvil y el lineal o de avance frontal. **El fijo** se caracteriza porque rota alrededor de un punto fijo o pivote, este punto está anclado a base de hormigón y posee longitudes entre 500 m a 600 m aproximadamente; **el móvil** es de menor tamaño que los fijos.

Generalmente con una longitud entre 200 m a 300 m, que al momento de terminar un riego en una parcela se modifica manualmente la dirección de las llantas y el pivote es halado por un tractor para regar una siguiente, es necesario que en cada posición exista una fuente de agua que alimente al pivote. Por último se tiene el **avance frontal** que riega superficies rectangulares que por medio de un giro en modo pivote le permite regar en franjas paralelas (Traxco 2009).

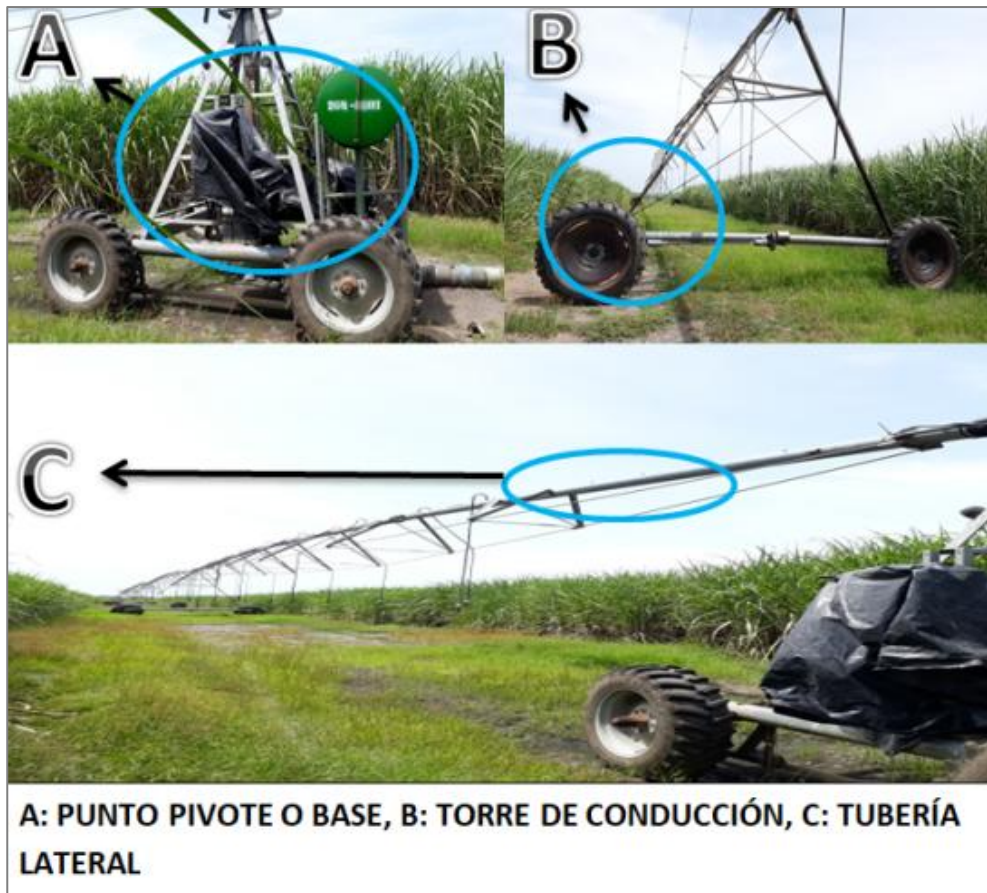


Fuente: elaborado con base en Traxco (2009).

Figura 9. Tipos de pivote: fijo, móvil y avance frontal.

E. Componentes del pivote central

Se puede decir que la estructura general del pivote considerando la definición por Chu (1980) y Tarjuelo citado por Moreno Martino (2016), tiene las partes de un punto pivote o base, la tubería lateral donde circulará el agua y las torres de conducción (figura 10).



Fuente: elaborado con base en Chu (1980).

Figura 10. Componentes del pivote central.

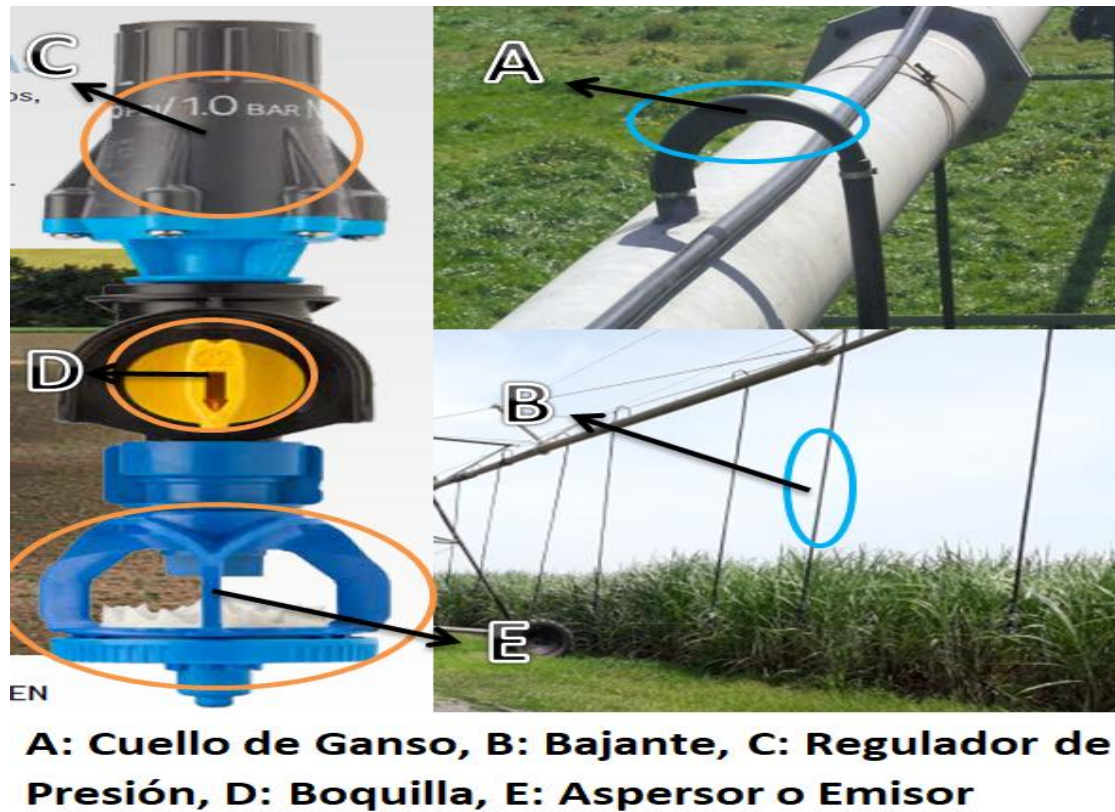
A su vez, las torres se enumeran en correlativo, considerando la más cercana a la base como número 1. Al final de las torres de conducción, una sección de la tubería lateral ya no es soportada por ninguna torre, a esta se le conoce como voladizo y puede llevar instalado un aspersor final tipo cañón del inglés “end gun”, así como se aprecia en la figura 11.



Fuente: elaborado con base en Chu (1980).

Figura 11. Componentes del voladizo del pivote.

A lo largo de la tubería lateral, se deben instalar el conjunto de aspersores o emisores. Para lograr tal fin, se solda un accesorio llamado cuello de ganso que generalmente es de aluminio en la tubería lateral, esto se logra perforando salidas a lo largo de la tubería siendo la distancia entre dichas salidas acorde al diseño de la estructura. Al cuello de ganso se le conecta una manguera llamada bajante que tendrá como función llevar el agua a la altura deseada de rocío, y al final del bajante, se conectará el regulador de presión, seguidamente el aspersor, y dentro del aspersor se colocará una boquilla de numeración variable (Nelson 2011). La figura 12 muestra lo descrito.



Fuente: elaborado con base en Nelson (2011).

Figura 12. Componentes del aspersor de riego en el pivote.

Por último, el aspersor es el encargado de dispersar el agua formando el patrón de lluvia, sin embargo la cantidad de agua que está vaya a dispersar dependerá directamente de la boquilla seleccionada y el regulador de presión utilizado (cuadro 41A). Las boquillas tienen una numeración variable según fabricante. Nelson Company las enumera desde un número 9 hasta 50, siendo la primera de menor caudal y la última de mayor caudal. Cada boquilla puede utilizar diferente regulador de presión y así el caudal de descarga; Nelson Company ofrece reguladores de 6 psi, 10 psi, 15 psi, 20 psi, 25 psi, 30 psi, 40 psi y 50 psi de presión (Nelson 2011).

F. Eficiencia en los pivotes

El sistema por pivote central, se caracteriza por ser de alta eficiencia, como lo afirman Palacios Mondaca et al. (2017), que indica que presenta ventajas sobre otros métodos; este comentario es apoyado por Martin et al. (2012) que indica que el pivote tiene el potencial de ser muy efectivo y uniforme si los emisores son seleccionados correctamente para las condiciones de campo donde será utilizado.

A su vez Evans y King, citado por Palacios Mondaca et al. (2017), a través de un estudio del riego por aspersión con vistas hacia el futuro concluyen 3 puntos que hacen competente al sistema que son la uniformidad y alta eficiencia de aplicación, alto grado de automatización de las máquinas y capacidad de aplicar agua en un amplio rango de suelos y topografías.

Es importante señalar que para que el sistema sea competente en términos de alta uniformidad y eficiencia de aplicación, es necesario realizar una correcta selección del paquete de aspersores con sus boquillas a utilizar, y estos deben estar espaciados apropiadamente y a una altura sobre el suelo apropiada para la maximización de la uniformidad de aplicación según lo indican Martin et al. (2017), a través de un manual desarrollado para el diseño del pivote central. Esto concuerda con la afirmación que Keller et al, citado por Tornes (2009), establecen que la uniformidad depende mucho más del manejo de los sistemas de riego que del sistema utilizado.

G. Cartilla de Aspersión y su funcionamiento en los pivotes centrales

De acuerdo a Paz Fong (2010), la cartilla de aspersión la define como el documento que el fabricante proporciona al comprador donde describe el orden de colocación del paquete de aspersores con su boquilla respectiva y reguladores de presión a lo largo de la tubería lateral.

En él se detalla la posición individual de todos los aspersores a lo largo de la tubería lateral, el requerimiento en caudal y presión de cada uno y el número de boquilla a utilizar para alcanzar dicho requerimiento, cabe mencionar que este último dependerá del catálogo comercial de los diferentes fabricantes (ejemplo en el cuadro 9).

Así mismo, contiene datos de la lámina de riego aplicada y el tiempo de aplicación en función de la velocidad del trabajo del sistema. Según Ramírez (2018), en una capacitación brindada al personal de riego del Ingenio Santa Ana, la integración de los 3 aspectos mencionados, sirven para la planificación del riego.

En el manual de operación de Valley citado por Paz Fong (2010) se afirma que mientras más despacio se desplaza el sistema sobre el campo, más tarda en dar una revolución, aplicando a su vez una lámina de riego mayor. Por lo que un ajuste en velocidades de trabajo adecua la lámina de riego a aplicar según las relaciones suelo-planta-agua en la planificación del riego.

Paz Fong (2010), indica que la cartilla se basa en un diseño previo. A su vez la empresa proveedora Traxco, en su sitio web señala que el apropiado cálculo garantiza la alta eficiencia y uniformidad, minimizando los costos energéticos y aumentando el rendimiento agrícola.

Como soporte brinda razones para su elaboración como; mejorar la uniformidad de distribución del agua, realizar cambios de los aspersores o solo las boquillas difusoras, reducir la escorrentía, ajustar el caudal del sistema de acuerdo a los requerimientos del cultivo. Martin et al. (2017) mencionan que la operación del sistema a las presiones de diseño elimina problemas observados en la uniformidad de aplicación.

A continuación, en el cuadro 9 se presenta un ejemplo de la cartilla de aspersión para el pivote central.

Cuadro 9. Ejemplo de cartilla de aspersión del pivote central.

SENNINGER IRRIGATION													
Fecha: 8/24/2017				Carta No: S092977									
UBICACIÓN				DATA HIDRAULICA				DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE					
DISTANCIA DE				SALIDA CAUDAL REQ (LPS)	CAUDAL SALIDA ACTUAL (LPS)	PRESS TUBERIA LATERAL (BAR)	PRESS ASP (BAR)	LONGITUD DE GOTA (cm)	REG PRES MODELO	MODELO DE ASPERSOR SENNINGER	TAMAÑO		
NO.	ULTIMA SALIDA (M)	ULTIMA TORRE (M)	PUNTO PIVOTE (M)								BOQUILLA (64 TH INCH)	GANZO	
SALIDA											& COLOR		
Pivot - Gauge													
1-Plg			1.1										
2-Plg			1.7										
3-Plg			2.3										
4-Plg			3.1										
5-Plg			3.9										
6-Plg			4.6										
7-Plg			5.4										
8-Plg			6.1										
9-Plg			6.9										
10-Plg			7.6										
11-Plg			8.4										
12-Plg			9.1										
13-Plg			9.8										
14-Plg			10.6										
15-Plg			11.3										
16-Plg			12.1										
17-Plg			12.8										
18		13.63	13.6	0.03	0.05	2.14	0.79	294	PSR-2-10	lwob UP3 Std 9 Grv	6-GOLD	1 G	
19-Plg			14.3										
20-Plg			15.1										

Fuente: elaborado con base en Senninger (2017).

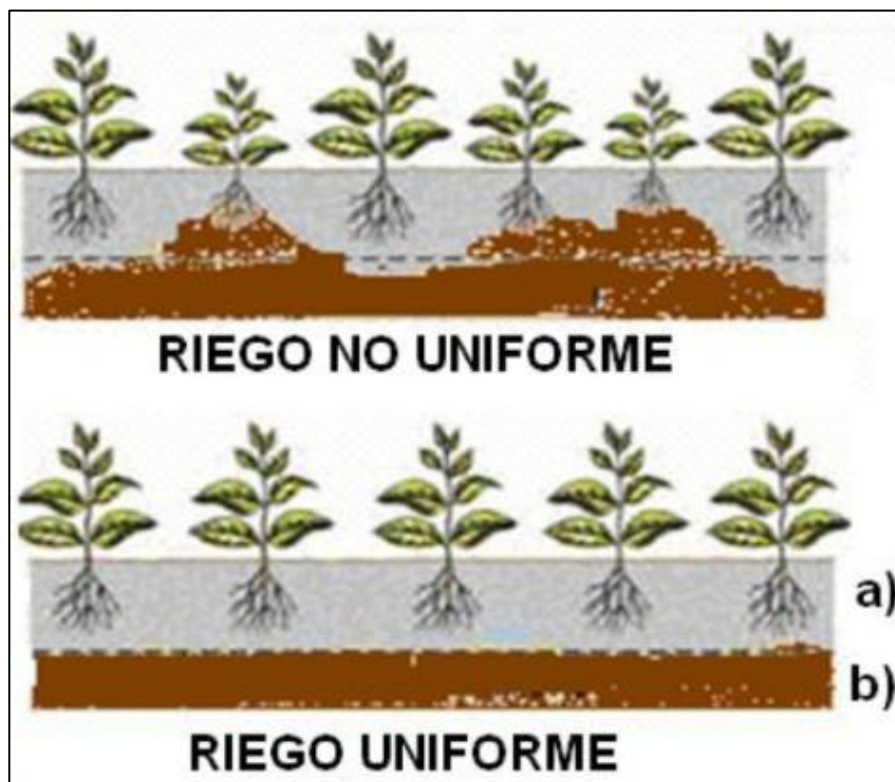
En el cuadro 9 se muestra un ejemplo de cartilla de aspersión. Se puede observar la personalización del paquete de aspersores con boquillas, porque cada emisor (aspersor con boquilla) es diseñado específicamente para un punto en el lateral (a cada punto donde es posible instalar un aspersor se conoce como salida y el ejemplo se numera en correlativo “15-plg, 16 plg, 17 plg, etc). Traxco (2017), indica que el caudal requerido en un punto está en función de la distancia de este respecto al centro del pivote.

Siendo la columna “punto pivote” donde se muestra esta distancia en metros; así mismo, afirma que para que el riego sea uniforme en una superficie regada, en los puntos más cercanos el pivote riega por más tiempo (requieren menor caudal) y viceversa con los más lejanos (requiriendo mayor caudal).

H. La uniformidad de riego y su relación con las cartillas de aspersion en los pivotes centrales

La uniformidad de riego según García Casillas, citado por Paz Fong (2010), se define como la distribución más o menos uniforme del agua infiltrada en el suelo después de un riego aplicado (figura 13). Es uno de los aspectos más importantes en la actividad del riego ya que se encuentra directamente relacionado con el rendimiento de los cultivos (Pérez et al. 2010).

Según lo indican Pérez Leira et al. (2015), la mala uniformidad se ha compensado con riegos más abundantes que ocasiona un consumo innecesario de agua y energía, a su vez este exceso contribuye a un lavado de fertilizantes aplicados.



Fuente: tomado de Ecured (2020).

Figura 13. La uniformidad alcanzada después de un riego.

De acuerdo con Foley y Raine, citado por Moreno Ramírez (2016), en un estudio de los pivotes centrales, establecen factores que influyen directamente en la uniformidad, que son el incorrecto espaciamiento de los emisores, la presión de operación, tipo de aspersor, tamaño de boquilla y su distribución a través de la tubería lateral del pivote. Sin embargo, Pérez Leira et al. (2010) afirman que no existe una relación entre el tipo de aspersor con la calidad del riego ni con el rendimiento.

El viento es otro factor que influye en la uniformidad como lo afirman Cameiro et al. (2017), Sin embargo, Pérez Leira, et al. (2015), encuentran que, si bien el viento es influyente, el factor principal que afecta está relacionado son los desperfectos técnicos y los montajes incorrectos de boquillas y reguladores de presión.

En adición, González et al. (2002), afirman que la histéresis (pérdida de memoria de los aspersores por desgaste) afecta a largo plazo y repercute en la uniformidad de distribución. Pérez Leira y Sabatier Corrales (2015), concuerdan con lo dicho al afirmar que el desgaste en reguladores de presión y boquillas incide en la baja uniformidad y por consiguiente en bajos rendimientos.

I. La calidad técnica del riego medida a través de la uniformidad

Partiendo del objetivo principal del riego que es proveer únicamente de agua en cantidades necesarias para el desarrollo óptimo de los cultivos y que esta sea representativa en la extensión del sitio cultivado, se obtiene que el riego debe ser eficiente (lámina de riego adecuada) y uniforme (todas las plantas reciben la misma cantidad).

Por lo tanto, la calidad técnica toma como parámetro de comparación la uniformidad alcanzada en un riego independientemente del método empleado. Los estudios que evalúan la calidad técnica toman la uniformidad como base para posteriores análisis de índole económico, hidráulico, etc.

Por lo anterior, la evaluación de la calidad técnica de riego tiene como objetivo conocer el funcionamiento real de un sistema en comparación con las especificaciones del fabricante; considera la uniformidad como uno de los aspectos más importantes en ser sometidos a análisis (Herrera y Correa 2005). De acuerdo a Palacios Mondaca et al. (2017) los índices de desempeño regularmente utilizados son el coeficiente de uniformidad y la uniformidad de distribución.

El **coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (CUh)** es una modificación de la ecuación empleada por Christiansen. El CUh es ampliamente utilizado como evaluador de la uniformidad en el pivote central en numerosos estudios. (Pérez Leira et al 2010, 2015, Tornos et al 2009).

$$CU_H = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Vi - V| Si}{\sum_{i=1}^n Vi \times Si} \right]$$

Fuente: tomado de Pérez Leira et al. (2010).

Ecuación 1. Coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (Cuh).

Para la evaluación de uniformidad se utilizan pluviómetros que recogen el agua que ha sido descargada por el pivote en longitud total. Considerando la distancia en que se encuentra cada pluviómetro de la base del pivote y la cantidad de agua recogida, utilizando la formula anterior, se evalúa la calidad de riego.

Por otra parte cada pluviómetro representa una corona circular del área creciente a medida que se aleja del punto pivote; es un indicativo de la calidad del riego considerando el desempeño en conjunto de los emisores bajo condiciones de campo, ambiente y presión (Palacios Mondaca et al. 2017). Se han establecido categorías para la clasificación de los valores del CUh. En el cuadro 10 se observan los criterios utilizados para la interpretación.

Cuadro 10. Criterios de calidad de riego según Cuh.

Coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (Cuh)	
Valor (%)	Categoría
>90	Muy bueno
85-90	Bueno
80-84	Regular
<80	Malo

Fuente: elaborado con base en Palacios Mondaca et al. (2017).

Por su parte, la **uniformidad de distribución (UD_{25%})**, propuesta por Keller y Bliesner, citado por Pérez Leira et al. (2015) hace referencia al valor promedio ponderado de láminas en el cuarto inferior de todos los pluviómetros utilizados. Es decir, si se utilizan 40 pluviómetros, se realiza el cálculo promedio de los 10 más bajos. De acuerdo a Tun, citado por Palacios Mondaca et al. (2019) requieren un valor del 80 % de UD como mínimo, y cuando se obtienen valores por debajo de lo requerido se debe principalmente al mal diseño de los sistemas utilizados. La ecuación para su cálculo es;

$$UD = \frac{\text{Lámina media en el 25 \% del area menos regada}}{\text{Lámina media de toda el area}} \times 100$$

Fuente: tomado de Jiménez Espinosa (2011).

Ecuación 2. Uniformidad de distribución (UD).

Por otro lado, Pérez Leira et al. (2015), recomiendan utilizar, además del Cuh y la UD_{25%}, otros evaluadores que son el área regada adecuadamente (ARA), área regada excesivamente (ARE) y área regada insuficientemente (ARI). De manera general se conoce como ARA, a toda el área de riego en el pivote central que recibe una lámina de riego de +/- un 15 % respecto a la lámina media. El área de riego que reciba más de ese 15 % se conocerá como ARE, y el área de riego que reciba un menos 15 % de la lámina media se conocerá como ARI.

Para ejemplificarlo asumiendo que la lámina media de un pivote es de 20 mm, las diferentes áreas pueden recibir láminas entre 17 mm a 23 mm para ser consideradas

como apropiadas (ARA). Si las áreas reciben 25 mm, se encuentra fuera del rango máximo por lo que se conocerá como excesivo (ARE). En contraparte si el área recibe 15 mm, esta es una lámina insuficiente ya que no alcanza los 17 mm mínimos, por lo que el área se conoce como insuficiente (ARI).

J. Fundamentos del diseño de cartillas de aspersión del pivote central

De acuerdo a la Real Academia Española de la Lengua (RAE, 2018), la palabra diseño hace referencia a un proyecto, el plan que configura algo, también lo define como una concepción original de cualquier objeto u obra. La palabra “rediseño” no está registrada en el diccionario, sin embargo, el prefijo “re” indica el resultado de volver a diseñar algo.

Tomando en consideración la definición propuesta por la RAE y partiendo del concepto de cartilla de aspersión planteado por Paz Fong (2010), el rediseño es el procedimiento que se lleva a cabo para realizar modificaciones a la cartilla de aspersión de un pivote central, teniendo como consecuencia un mejoramiento en la uniformidad de riego.

Las modificaciones en la cartilla de aspersión se realizan basadas tanto en aspectos agronómicos como hidráulicos. Los aspectos agronómicos están enfocados para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos, considerando las relaciones suelo-planta-agua y los hidráulicos determinan el requerimiento energético para conducir el agua a presión en la tubería lateral del pivote central.

González et al. (2002), en un artículo publicado para la revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, brinda unas consideraciones para el diseño, explotación y adquisición de máquinas de pivote central. De los temas tratados, hace referencia al **hidromódulo** definiéndolo como el caudal necesario que dota al pivote para la operación continua en el área de cultivo, definiendo la capacidad del equipo de bombeo, incidiendo directamente en los costos por operación, por lo que un sobredimensionamiento provoca un gasto excesivo de energía.

Existen numerosos estudios que emplean el término hidromódulo y brindan recomendaciones al respecto. Se establece que para cualquier equipo se puede utilizar un hidromódulo fijo de 1.20 L por segundo por cada hectárea de riego (lps-ha). Sin embargo, Pérez Leira y Martínez González (2004) recomiendan no utilizarlo al ser un caudal arbitrario y que no parte de un diseño agronómico específico para un cultivo en interés. Chu (1980) plantea una ecuación para la determinación del hidromódulo que es:

$$Q = 453 \times A \times \frac{DG}{TR}$$

Fuente: tomado de Chu (1980).

Ecuación 3. Hidromódulo propuesto por Chu.

Dónde:

Q= es el caudal en galones por minuto.

A= el área de riego en acres.

DG= lámina bruta de riego (del inglés gross depth of application) en pulgadas.

TR= el tiempo por revolución del pivote en horas.

La ecuación empleada por Chu considera los aspectos: el área a regar, la lámina de riego a aplicar y el tiempo necesario para la aplicación, esta misma fórmula se puede presentar de la siguiente forma:

$$\text{Hidromodulo} = \frac{\text{Area de riego} \times \text{lamina a aplicar}}{\text{Tiempo de riego}}$$

Fuente: adaptado de Chu (1980).

Ecuación 4. Demanda de agua de un proyecto de riego.

Considerando los aspectos que se utilizan para la determinación del hidromódulo, estos están inmersos en lo que se conoce como **programación de riego**, que da respuesta a las interrogantes: **¿cuánto regar?** (lámina de riego), **¿cuándo regar?** (frecuencia de riego) y **¿cómo regar?** (método de riego empleado), para obtener la máxima eficiencia en

el uso del agua y rendimiento de los cultivos. Todos estos requerimientos se determinan a través del proceso del diseño agronómico del cultivo.

K. Diseño agronómico del cultivo en el rediseño de la cartilla de aspersión

Según Camejo Barreiro et al. (2017), el diseño agronómico lo define como el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo de acuerdo con las condiciones climáticas donde se desarrolle y las normas de riego en función del tipo de suelo y con la eficiencia de riego, así como los intervalos y número de riegos que se requieren conforme el ciclo vegetativo del cultivo.

Para todo proyecto de riego, la determinación de las necesidades de agua es un elemento básico que se utiliza para dimensionar las obras de infraestructura de riego, así como planificar y programar el riego de los cultivos a nivel parcelario (Vásquez et al 2017).

a. Necesidades hídricas de los cultivos

La determinación del consumo de agua de los cultivos llamada **evapotranspiración** se realiza mediante la utilización de diferentes métodos, midiéndose una altura o lámina de agua dada normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo, siendo esta unidad; hora, día, mes o incluso un completo período de cultivo de un año; como una hectárea tiene una superficie de $10,000 \text{ m}^2$ y 1 milímetro es igual a 0.001 m, una pérdida de 1 mm de agua corresponde a una pérdida de 10 m^3 de agua por hectárea.

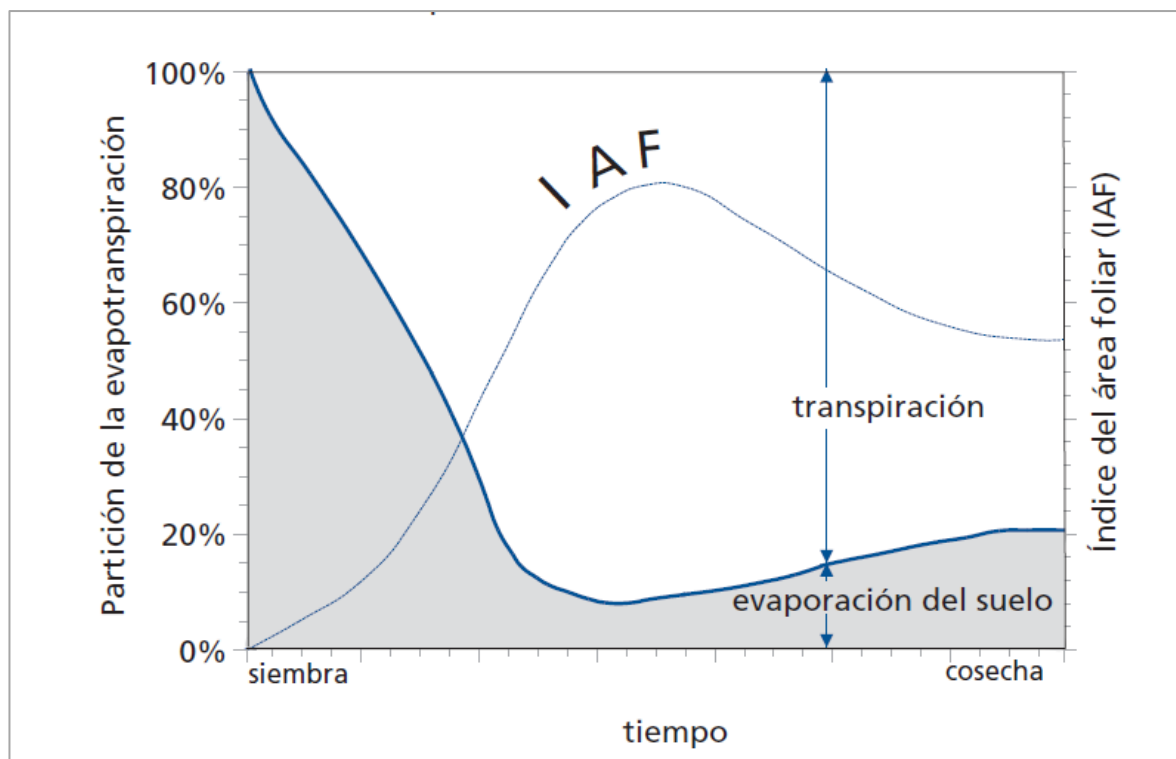
La mayoría de los métodos utiliza variables climáticas para la estimación de la evapotranspiración como evaporación de tanque clase “A”, temperatura, humedad relativa, radiación solar, entre otros (Vásquez et al. 2017). Para comprender este fenómeno, es necesario comprender conceptos individuales de evaporación del suelo y transpiración de las plantas.

La evaporación es el proceso donde el agua líquida pasa a su estado gaseoso y se retira de la superficie evaporante, siendo esta una variedad de superficies como los mares, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada. Para que ocurra este fenómeno se requiere de energía y es el sol el proveedor; para el caso de los campos cultivados se refiere a la evaporación directa del suelo.

A su vez **la transpiración** es un proceso de pérdida de agua de las plantas a través de sus estomas a la atmósfera. Puede considerarse una pérdida de agua pero no es estrictamente de esa manera, debido que funciona como efecto refrigerante. Así también si bien los estomas son el principal medio de salida de agua de la planta al exterior también sirven para la entrada de dióxido de carbono (CO_2) y la salida del oxígeno (O_2) (Allen et al. 2006).

La evaporación y la transpiración ocurren de forma simultánea y es difícil distinguir entre estos dos procesos, por lo que surge el concepto de evapotranspiración como manera conjunta de estimar estas dos pérdidas de agua en un campo cultivado.

La evaporación en el campo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo, disminuyendo conforme el cultivo se va desarrollando y proyecta más y más sombra sobre este. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal (Allen et al. 2006). La figura 14 muestra lo anterior.



Fuente: tomado de Allen et al. (2006).

Figura 14. Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el período de crecimiento de un cultivo anual.

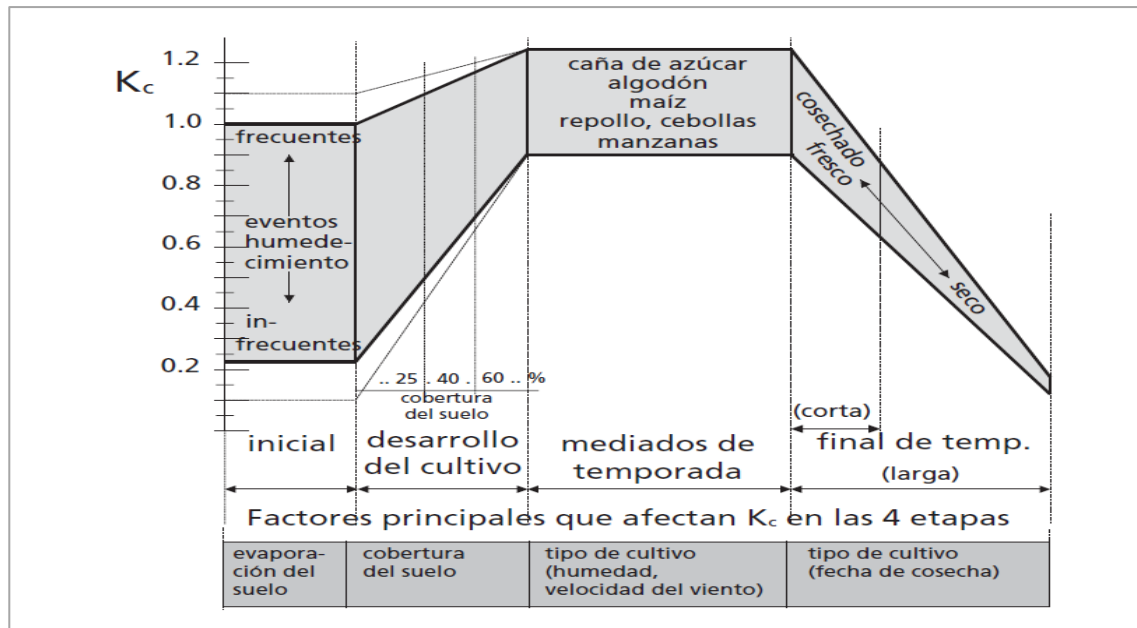
La evapotranspiración en conclusión es el proceso por medio del cual un campo cultivado consume agua para su crecimiento y desarrollo. El consumo de agua para un cultivo en específico considera dos factores; el clima y características de crecimiento y desarrollo del cultivo propio. Para la medición del clima se debe atender el concepto de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) que considera variables climáticas, y el estado de desarrollo por medio del coeficiente del cultivo uso.

La **evapotranspiración de referencia (ET_o)** se produce en un cultivo de tamaño corto (generalmente pasto) que cubre toda la superficie del suelo, en estado activo de crecimiento y con un suministro adecuado y continuo de agua. Su cálculo puede estar por métodos directos (lisímetro, tanque de evaporación clase "A", muestreo de humedad del suelo) e indirectos (Hargreaves, FAO Penman-Monteith, Blaney – Criddle, Radiación, Christiansen, Jensen – Haise, entre otros).

De los métodos indirectos el más utilizado es el método de FAO Penman-Monteith, esto como resultado de una consulta de expertos realizada en mayo de 1990, siendo requeridos datos de radiación solar, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento (Allen et al. 2006).

De acuerdo al enfoque del coeficiente del cultivo, la **evapotranspiración del cultivo (ETc)** se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia E_{to} y el coeficiente del cultivo k_c . La mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentra inmersos en la E_{to} , por lo tanto, mientras E_{to} representa un indicador de la demanda climática, el valor de k_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima.

Esto hace posible el intercambio de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas. Este hecho constituye la razón principal de la aceptación general y utilidad de la metodología del coeficiente del cultivo, así como los valores de k_c desarrollada en estudios anteriores. En la figura 15 muestra los rangos típicos de valores de k_c .



Fuente: Tomado de (Allen et al. 2006).

Figura 15. Rangos típicos esperados del valor de k_c para las cuatro etapas de crecimiento.

b. Normas de riego según tipo de suelo

De una lluvia intensa o la aplicación de un riego, un suelo se satura de agua. Después de dejar drenar libremente ese excedente de agua el suelo queda en un punto óptimo de humedad conocido como **capacidad de campo**. A partir de este punto las plantas inician la extracción de agua por medio de las raíces que utilizan para la evapotranspiración referida en la sección anterior, por lo que conforme avanza el tiempo el contenido de humedad en el suelo es cada vez menor, llegando a un punto donde las plantas ya no pueden extraer más agua, a dicha condición en el suelo se le conoce como **punto de marchitez permanente**.

Conociendo esos dos niveles, se puede hablar de la Humedad aprovechable total que es la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente conocido también como **lámina de agua aprovechable (LAA)**. Esta LAA, se determina en la zona de aprovechamiento de raíces (**profundidad radicular**) que varía dependiendo la especie,

estado de desarrollo, condiciones de humedad, la naturaleza física y características intrínsecas del perfil del suelo que pueden resumidas en la **densidad aparente** del suelo.

También es necesario resaltar que no toda el agua es aprovechable en todo el rango de humedad. A medida que disminuye su nivel, el cultivo requiere de mayor energía para extraer el agua, afectando la velocidad de uso del agua por parte del cultivo y por ende su producción. A raíz de esto último se ha introducido un factor de carácter fisiológico, característico de cada especie, que indica la fracción de la humedad aprovechable a partir de la cual el cultivo empieza a manifestar síntomas fisiológicos adversos (clorosis, disminución de crecimiento, marchitez, entre otros), a este factor se le conoce como humedad fácilmente aprovechable o **lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA)**.

Por último se describe el intervalo de riego o **frecuencia de riego** que se define como el número de días transcurridos entre dos riegos consecutivos. Esta frecuencia de riego, parte de dos elementos; conocimiento de la lámina de agua rápidamente aprovechable, según el tipo de suelo, y el requerimiento de agua medido a través de la evapotranspiración, por lo que cada día que pase, el contenido de agua aplicado será consumido por la planta según su requerimiento.

c. Eficiencias del riego

En la operación de todo sistema de riego, ocurren pérdidas de agua tanto en el sistema de almacenamiento, conducción, distribución y a nivel parcelario. Se considera al agua como un recurso vital y sumamente escaso. En este sentido, su manejo debe ser eficiente a fin de preservar dicho recurso para asegurar su sostenibilidad en el tiempo y en el espacio.

En el diseño de un sistema de riego, se deben considerar las pérdidas que ocurren, con el fin de asegurar el abastecimiento adecuado y oportuno de agua para el riego de los cultivos.

La eficiencia de riego del proyecto, del distrito de riego, del campo de cultivo, sirve para responder preguntas como ¿Cuál es la demanda de agua del proyecto?, ¿Qué cantidad de agua se aplicará en el riego?, ¿Cuál será la eficiencia entre riegos?, etc. Esta eficiencia está dada por la relación entre el volumen de agua evapotranspiradas por las plantas y evaporación del suelo (E_{to}) más la cantidad de agua necesaria para mantener una concentración adecuada de sales en el perfil enraizado del suelo, menos la precipitación efectiva caída, menos la ascensión capilar producida desde la capa freática; por un lado; y, por el otro lado, al volumen de agua derivado extraído de la fuente de abastecimiento, que puede ser un río, reservorio, un pozo tubular o un manantial para ser usado en el riego.

Para el caso específico del pivote central, se han realizado estudios respecto a la eficiencia de riego y según Castro (2018) para el sistema de caña de azúcar la eficiencia de riego puede oscilar entre 85 % - 90 %.

L. Diseño hidráulico en el rediseño de las cartillas de aspersión

Con el diseño agronómico se ha determinado los requerimientos de agua de sistema, por lo que ha servido para el cálculo del hidromódulo según lo refiere González et al. (2002).

El hidromódulo debe estar acorde a la capacidad de tubería, siendo definida por el diámetro, ya que como lo indica Chu (1980), las pérdidas por fricción en la presión de operación del pivote varían de acuerdo al tamaño de la tubería seleccionada y este repercutirá directamente en el requerimiento energético del sistema.

La forma que se utiliza para saber si un caudal es apto al diámetro de una tubería es considerando las velocidades mínimas y máximas de los fluidos confinados, es decir los diámetros escogidos deben producir velocidades dentro de estos límites (Fernández 2012). En el cuadro 11 se detallan velocidades medias en tuberías.

Cuadro 11. Velocidad media en tuberías que origina diseños más económicos.

Tipo de tubería	Velocidad media m/s	
	Mínima	Máxima
Tuberías de succión en bombas centrífugas, de acuerdo con la carga de succión, longitud, temperatura del agua (< 70 °C)	0.50	1
Tuberías de descarga en bombas	1.50	2
Redes de distribución para agua potable e industrial:		
Tuberías principales	1	2
Tuberías laterales	0.50	0.70
Tuberías muy largas	1.50	3

Fuente: tomado de Sotelo Ávila (1994).

Cabe mencionar que el requerimiento energético de dicho sistema se conoce como carga dinámica total, tal como lo menciona Fernández (2012), y además, enfatiza que representa todos los obstáculos que tendrá que vencer el líquido impulsado por una máquina (expresados en metros columna agua m.c.a) para poder llegar hasta el punto específico, siendo estos obstáculos la diferencia de altura, presión de operación, y las pérdidas por fricción.

La diferencia de altura o desnivel entre dos puntos es la altura o cota de uno de ellos referida a la superficie de nivel del otro, para el caso del pivote estos dos puntos se relacionarían con su base y el aspersor más lejano. Ahora la presión de operación, se define como la presión requerida en el aspersor utilizado para que funcione adecuadamente descargando el caudal seleccionado. Por último, se toma el tema de las pérdidas por fricción, el cual es la pérdida de presión que se da por la conducción de agua en tuberías confinadas; Martin et al. (2011), describen la ecuación de Hazen-Williams en el libro de mecánica de fluidos flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles.

$$Hf = \frac{1.21 \times 10^{10}}{d^{4.87}} \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} \times L$$

Fuente: tomado de Martin et al. (2011).

Ecuación 5. Pérdidas por fricción de Hazen-Williams.

La ecuación de Hazen-Williams que se describe, está condicionada al diámetro de la tubería, el caudal que se transporte y un coeficiente que depende de la naturaleza (material y estado) de las paredes de los tubos (Fernández 2012). Los coeficientes de acuerdo a Sotelo Ávila (1994) se presentan en el cuadro 12.

Cuadro 12. Coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams.

Material	Coeficiente	Material	Coeficiente
Asbesto-cemento (nuevo)	135	Concreto, acabado común	120
Cobre y latón	130	Acero galvanizado (nuevo y usado)	125
Ladrillo de saneamiento	100	Acero remachado nuevo	110
Hierro fundido, nuevo	130	Acero remachado usado	85
Hierro fundido, 10 años de edad	107 - 113	PVC	140
Hierro fundido, 20 años de edad	89 - 100	PE	150
Hierro fundido, 30 años de edad	75 - 90	Plomo	130 - 140
Concreto, acabado liso	130	Aluminio	130

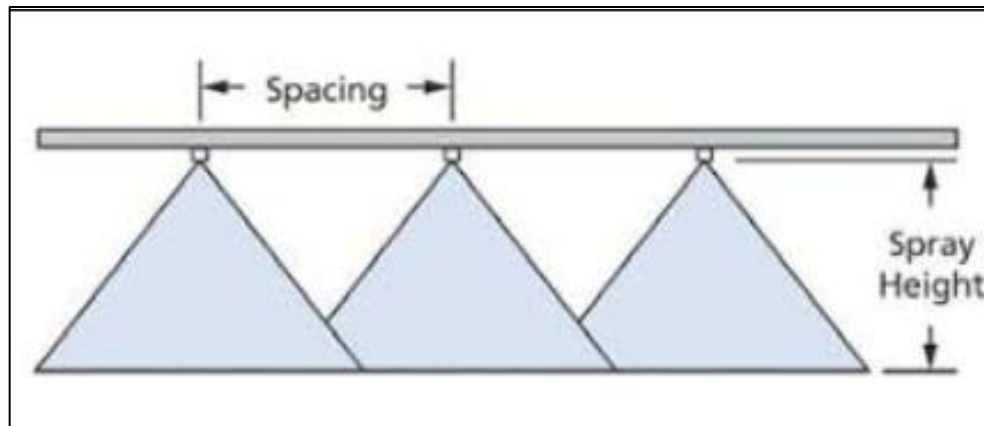
Fuente: tomado de Sotelo Ávila (1994).

Por otra parte, según Domínguez, citado por Tornés (2009), la utilización de aspersores con boquillas de baja presión colocados de 1 m a 2 m sobre el suelo, puede aumentar la uniformidad de riego, ya que, según su estudio, este aumento del 65 % - 70 % hasta el 80 % - 86%. Con estos cambios, Pérez Leira et al. (2015) determinan la altura idónea para la colocación en concordancia con los resultados presentados por Domínguez. Además, los aspersores de baja presión (10 psi - 18 psi), presentan la ventaja que gastan menos energía en comparación con las antiguamente utilizadas (30 psi - 60 psi) (González et al. 2002).

M. Distribución de aspersores y diseño de las boquillas y reguladores de presión utilizados en la cartilla de aspersión

El diseño agronómico e hidráulico son elementos fundamentales en cualquier diseño de riego, sin importar el método. Sin embargo, para el caso del pivote central, la esencia del diseño de la cartilla de aspersión es la **distribución de los aspersores** y el **diseño de sus boquillas**.

La **distribución de aspersores** está condicionado a dos factores: el primero es el diámetro de mojado del aspersor y el segundo la distancia que existe entre salidas que son puntos donde se puede instalar aspersores en la tubería lateral del pivote. La distribución, es decir el espaciamiento entre aspersores debe estar diseñado para que se logre un traslape adecuado, tal como lo afirma Gaudi et al. (2007). El traslape se logrará considerando la altura de colocación del aspersor con su boquilla y el ángulo de descarga y el espaciamiento entre los aspersores como lo muestra la figura 16.



Fuente: tomado de Teejet (2004).

Figura 16. Relación entre el espaciamiento, altura y ángulo de descarga de los aspersores con sus boquillas respectivas.

El distanciamiento entre salidas para instalación de aspersores viene predeterminado por el fabricante, por lo que se pueden encontrar salidas a distancias de 1 m, 1.50 m, 2 m, 2.50 m, 3 m, etc., entre cada una de ellas, siendo muy variable. Por tal razón y partiendo de la distancia entre aspersores para un traslape adecuado, se debe distribuir los

aspersores de tal forma que queden a distancias más o menos a la apropiada, sin embargo si la distancia entre aspersores promedio es de 3 m, no todos los aspersores quedarán a 3 m entre ellos, algunos quedarán a 2.50 m, otros a 3.50 m, otros a 1.50 m, etc., por la razón de la distancia entre salidas que es variable siendo ya parte de la estructura.

Una forma de evaluar el espaciamiento es analizando la equidistancia entre aspersores, esto puede ser medido por el coeficiente de variación (CV) que según Brown (1998), un CV excedente al 30 % es regularmente un indicativo de problemas en la data o que el experimento está fuera de control.

El **diseño de boquilla**, en esencia es la determinación del caudal requerido en cada aspersor, y la selección de una boquilla adecuada para suplir ese requerimiento de caudal. Existe una amplia variedad de boquillas en el mercado que descargan diferentes caudales a diferentes presiones, por lo que el diseñador debe escoger una boquilla que descargue el caudal requerido o si no es posible encontrar una coincidencia exacta, pues se utiliza una de coincidencia aproximada.

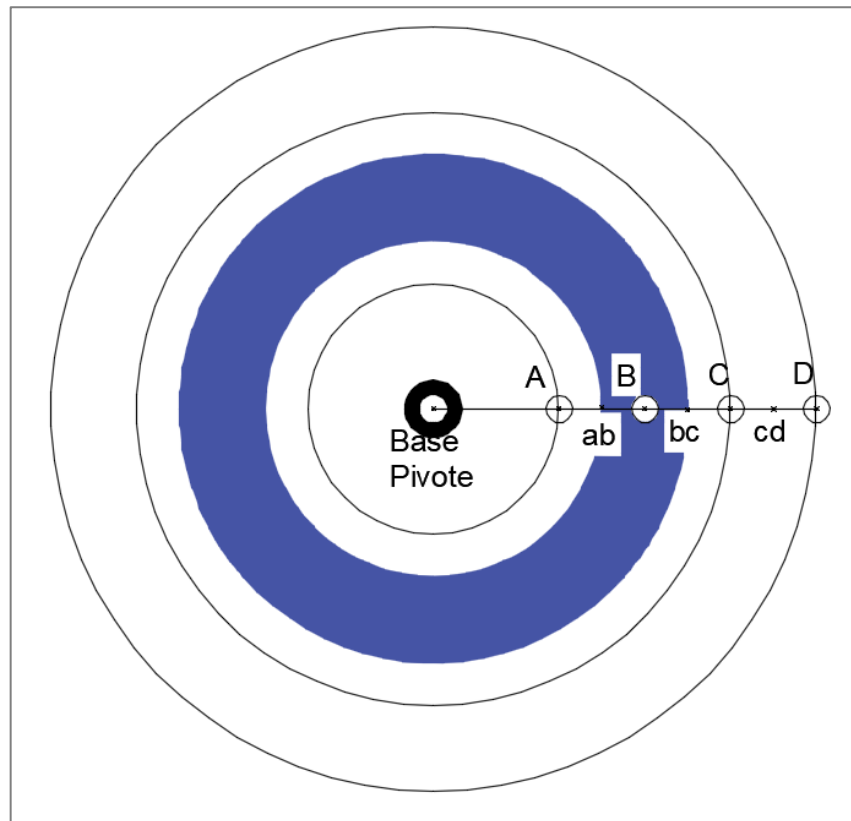
El caudal requerido en el aspersor es la cantidad de agua requerida por unidad de tiempo para poder aplicar una lámina de riego en el área de influencia o cobertura del aspersor. La lámina de riego a aplicar está directamente relacionada con el requerimiento del pivote central, y el área de cobertura se establece según el distanciamiento entre aspersores. El tiempo (T) utilizado para aplicar la lámina estará directamente relacionado con la velocidad (distancia/tiempo) del pivote central.

$$\text{Caudal requerido por aspersor} = \frac{\text{Área cobertura} \times \text{lámina a aplicar}}{\text{Tiempo de rotación}}$$

Fuente: elaborado en base a Chu (1980).

Ecuación 6. Caudal requerido en un aspersor en el pivote central.

El área cobertura del aspersor se obtuvo a través de la racionalización de la figura 17. En esta figura se muestra la posición de los diferentes aspersores representados por las literales A, B, C, D. respecto a la base del pivote. El área de cobertura para un aspersor se muestra de color azul y se conoce matemáticamente como corona circular.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 17. Área de cobertura de un aspersor en el pivote central.

Para conocer el área de cobertura de un aspersor (A_{ci}) se debe calcular el área de color azul que es el área para el aspersor B según la figura 17. Se debe conocer la distancia entre la base del pivote y el punto bc (Base-bc) y la distancia entre la base del pivote y el punto ab (Base-ab), siendo ab y bc distancias medias entre A-B y B-C respectivamente.

La distancia desde la base del pivote al punto “bc” se conoce como radio mayor (R) y la distancia desde la base del pivote al punto “ab” se conoce como radio menor (r), por lo que el cálculo del área quedaría de la siguiente forma:

$$Aci = \pi(Ri^2 - ri^2)$$

Ecuación 7. Área de cobertura del aspersor.

Dónde:

Aci = área de cobertura del aspersor.

R = distancia desde la base del pivote - punto bc según la figura 17.

r = distancia desde la base del pivote – punto ab según la figura 17.

Otros estudios hacen su énfasis en el empleo de reguladores de presión. De acuerdo con González et al. (2002), existen dos tipos de reguladores, el de flujo y el de auto-regulador de presión. El primero trabaja en proveer siempre el mismo caudal al aspersor, el segundo contrarresta bajas y altas de presión en cualquier punto de la tubería lateral. Por otro lado, se pueden diseñar sistemas sin regulador, si se considera que la diferencia de altura entre el punto pivote y el aspersor más lejano no sea mayor a 1.50 m.

Al momento del rediseño, la empresa Traxco (2016), recomienda aplicar una presión de 5 psi por encima de la presión de trabajo del regulador para su correcto funcionamiento, esto es corroborado por la empresa de riego Nelson (2011), que indica un margen adicional de 5 psi es necesario para asegurar el buen funcionamiento del regulador; por ejemplo, la presión mínima para un regulador de presión de 20 psi será de 25 psi.

N. Unificación de conceptos del diseño agronómico, diseño hidráulico, distribución de aspersores para diseñar la cartilla de aspersión del pivote central

Como primer paso para diseñar la cartilla de aspersión se realiza el cálculo del diseño agronómico como en cualquier diseño de riego, qué está en función del área total de riego

(el área estará en función de la longitud del pivote), necesidades de agua del cultivo, y tipo de suelo, con el diseño agronómico se determina el caudal necesario para la operación del pivote, es decir el **hidromódulo**.

Como segundo paso se debe determinar la lámina de riego mínima del pivote es decir la lámina aplicada cuando la velocidad de rotación es la mayor. El término lámina mínima se le atribuye al pivote central cuando opera a su mayor velocidad, esto debido a que el pivote siempre se encuentra descargando el mismo caudal y la forma para disminuir la lámina de riego es aumentando velocidad. Una lámina menor a la calculada ya no es posible a menos que se apague por completo el pivote.

Para el cálculo de la lámina de riego se considera el valor del hidromódulo del pivote (es decir el caudal determinado en el diseño agronómico), el área de riego del pivote que está condicionado por la longitud del mismo, y el tiempo de rotación que está en función de la velocidad (desplazamiento/tiempo) del pivote. Dicha velocidad está establecida por la torre más lejana con la cantidad de tiempo que tarda en dar una vuelta de 360 ° cuando opera a la mayor velocidad (%). Matemáticamente se expresa así:

$$Lamina\ a\ aplicar = \frac{Hidromódulo \times Tiempo\ Riego}{Area\ de\ riego}$$

Para conocer el área de riego se parte de la longitud total del pivote a través de: a través de;

$$Area\ riego\ del\ pivote = \pi \times longitud^2$$

Para conocer el tiempo de riego a velocidad máxima (100 %), se parte de la velocidad lineal de la última torre es decir cuantos metros se desplaza por unidad de tiempo, suponiendo que en una distancia de 10 m el pivote lo recorre en 2.10 min se obtiene:

$$Vel\ lineal\ al\ 100\ \% = \frac{10\ m}{2.10\ m} = 4.75\ m/min$$

Ahora se debe conocer el recorrido total de la torre de conducción que opera a dicha velocidad pivote y considerando que el recorrido es de forma circular, y conociendo la distancia que hay desde la base del pivote a la torre de conducción, se obtiene:

$$\text{Recorrido total torre (m)} = 2 \times \pi \times \text{distancia}$$

Conociendo la velocidad máxima de la torre de 4.75 m/min y la longitud a desplazar que es el recorrido de la torre se obtiene el tiempo que tarda en recorrer una vuelta de 360 °, y y con esto se obtiene el tiempo para regar la lámina mínima del pivote, es decir;

$$\text{Tiempo riego} = \frac{\text{Recorrido total torre (m)}}{\text{Velocidad máxima (desplazamiento (m) / tiempo (h))}}$$

Conociendo el dato de lámina mínima, y considerando que las láminas son inversamente proporcionales a la velocidad de rotación, se calcula las diferentes láminas de riego y tiempos de rotación en completar vueltas completas de 360 ° del pivote cuando se encuentra operando a diferentes porcentajes de velocidad. Se logra a través de:

$$\text{Tiempo en completar vuelta} = \frac{100 \% \times \text{Tiempo en completar vuelta al } 100 \%}{\text{Vel porcentual deseada}}$$

$$\text{Lamina pivote} = \frac{100 \% \times \text{Lamina mínima de riego}}{\text{Vel porcentual deseada}} =$$

Como tercer paso, se realiza la distribución de aspersores a lo largo de la tubería lateral. El espaciamiento utilizado dependerá del **diámetro de mojado** de cada aspersor según la boquilla utilizada y la **distancia que hay entre salidas** (las salidas son puntos a lo largo de la tubería lateral del pivote donde es posible instalar aspersores, estas distancias son preestablecidas por el fabricante del pivote y generalmente no son iguales, se encuentran salidas a 1 m, 1.50 m, 2 m, 3 m, etc., siendo muy variable).

Como cuarto paso se diseñan las boquillas que en esencia es el cálculo del caudal requerido para aplicar la lámina de riego del pivote y la selección de una boquilla adecuada que provea el caudal requerido (esta selección se realiza a través de la búsqueda en catálogos de fabricantes de boquillas). Las variables que están inmersas en el cálculo son las siguientes:

- Lámina de riego a aplicar del pivote.
- Área de influencia o cobertura del aspersor que está directamente relacionado con la distancia que hay entre el aspersor y la base del pivote y el distanciamiento utilizado entre aspersores.
- Tiempo que tarda en dar una vuelta completa de 360 ° el pivote condicionado a la velocidad de operación (desplazamiento/tiempo).

Como último paso, se realiza el diseño hidráulico que se encarga de determinar la carga dinámica total en el pivote para su operación (P), considerando las pérdidas por fricción ocurridas en la tubería (H_f lateral), la diferencia de nivel (Δh), y la presión requerida en el aspersor crítico, es decir el más lejano (P_e), es decir;

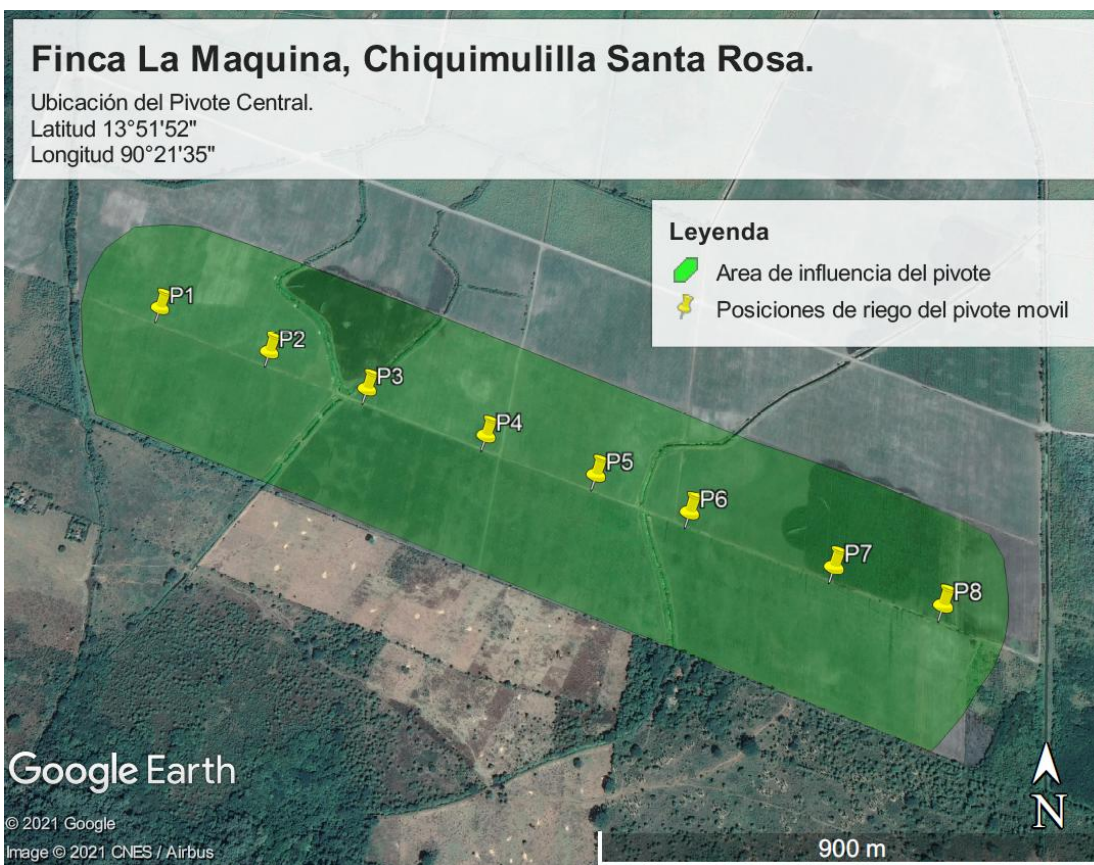
$$P = P_e + hf_{lateral} + hf_{menores} + \Delta h$$

3.2.2 Marco referencial

A. Descripción del lugar

La investigación se llevó a cabo en finca La Máquina, Región VII, del Ingenio Santa Ana. Se encuentra localizada en el municipio de Chiquimulilla departamento de Santa Rosa de la República de Guatemala. Las coordenadas del lugar son 13°51'52.5" latitud Norte y 90°21'35.0" longitud Oeste. Tiene 2 vías de acceso, una es por la ruta cañera de la zona

pacífica de Guatemala, y otra es por la carretera CA-2 que comunica la cabecera municipal con las aldeas Los Cerritos, La Bomba y El Aguacate. En la figura 18 se detalla la ubicación de la finca en estudio.



Fuente: elaborado en base a Google Earth (2021).

Figura 18. Plano de localización del proyecto.

Los puntos P1, P2, P3 de la figura 18, representan las diferentes posiciones donde el pivote se encuentra regando. Al tratarse de un pivote móvil este puede ser halado por tractor a diferentes posiciones para regar una mayor cantidad de área.

B. Caracterización del equipo de bombeo y cartilla de aspersión del pivote central

En el cuadro 13 se presenta la información de la caracterización del equipo de bombeo utilizado en el pivote.

Cuadro 13. Caracterización del equipo de bombeo y la cartilla de aspersión del pivote.

Motor		Bomba	
Marca	John Deere	Marca	Hidromac
Modelo	4024TF270	Modelo	AZ 4x5x11A
Potencia (hp)	40	Presión (psi)	42.60
Rpm	1,800	Caudal (gpm)	800

Resumen de la cartilla de aspersión	
No. De Torres	4
Longitud Total del Pivote	233.10 m
Numero de Aspersores	76
Espaciamiento entre aspersores	variable, 3.08 m de promedio
Boquilla utilizada	Senninger
Calibre del regulador de presión	20 psi

Fuente: elaboración propia, 2021.

El cuadro 13, muestra que el motor es de marca John Deere, modelo 4024TF270, con una potencia de 40 caballos de fuerza (hp) a 1,800 revoluciones por minuto (rpm) del motor, esto tomado de la curva de desempeño en la figura 31A del anexo. Así mismo, muestra que la bomba utilizada es de marca Hidromac, modelo AZ 4x5x11A, con una capacidad de 800 gpm a una presión de 42.60 psi, esto tomado de la curva de desempeño de la bomba en la figura 32A del anexo. Así también, el cuadro muestra que el pivote tiene un total de 4 torres, una longitud de 233.10 m, tiene un total de 76 aspersores, con un espaciamiento de 3.08 m en promedio, las boquillas son de marca Senninger y posee reguladores de presión de 20 psi.

C. Trabajos similares realizados en el rediseño de cartillas de aspersión en pivotes centrales

Uno de los objetivos del trabajo fue el rediseño de cartillas de aspersión en sistemas por pivote central. Para ello se utilizó Microsoft Excel® como hoja de cálculo para la realización del ejercicio matemático del rediseño. Mediante investigación, diversos autores han generado programas que diseñan pivotes centrales, utilizando diversos lenguajes de programación, los cuales son;

González y Navarro, citado por Pérez Leira y Martínez González (2004), diseñaron un programa de cómputo llamado PIVOT, que realizaba los cálculos hidráulicos del diseño de un pivote a partir de un hidromódulo fijo de 1.20 lps-ha, sin considerar aspectos agronómicos como las necesidades hídricas del cultivo, la infiltración básica del suelo, horas regadas por día. Aunque en el mismo trabajo se cita que en trabajos previos, González et al. (2002), recomienda un diseño con el hidromódulo fijo; con los resultados de la investigación concluyen que no es lo recomendable, ya que existe el riesgo de obtener una tasa de aplicación más alta que la infiltración provocando escurrimiento.

Pérez Leira y Martínez González (2004), en un trabajo de simplificación y adecuación del método de Allen para la determinación del caudal de diseño, indican que en Cuba el diseño hidráulico se realiza con programas de cómputo que tienen restricciones hidráulicas y operacionales. Esto es apoyado por los comentarios de Allen; Moreno et al.; Valín et al.; Montero et al.; Pérez et al.; Almeida et al.; Camejo et al., todos ellos citados por López et al. (2018), donde indican que, a pesar de la generación de varios programas, estos contienen distintas limitantes y no están completos.

En el año 2012, Valín desarrolló el programa llamado Depivot, el cual tenía como objetivo diseñar sistemas nuevos o realizar cambios a sistemas en operación (rediseño). Provee 5 aspectos de cálculo, los cuales son la lámina de riego requerida, el diámetro de tubería

lateral, selección de paquetes de aspersores, evaluación de la posible escorrentía provocada por el paquete seleccionado y la estimación de la uniformidad alcanzada. Se desarrolló en Visual Basic, utilizando la base de datos de Access (Valín et al. 2012).

Ya para el año 2018, un programa llamado CurvePivote 2.0 es lanzado, para el diseño hidráulico de los sistemas de riego por pivote, fundamentado en un modelo matemático que considera variables hidrogeológicas, edáficas, agronómicas, hidráulicas y económicas. Para el desarrollo se utilizó el lenguaje de programación C# y como producto se obtuvo un programa capaz de brindar el caudal de diseño al menor costo de inversión y operación (López Silva et al. 2018).

3.3 OBJETIVOS

3.3.1 Objetivo general

Evaluar la uniformidad de riego del pivote central de finca La Máquina, Chiquimulilla, Sta. Rosa, en caña de azúcar para mejorarla mediante el rediseño de la cartilla de aspersión.

3.3.2 Objetivos específicos

- A.** Determinar el estado actual de uniformidad de riego a través de los evaluadores CU, UD, ARA, ARE y ARE.
- B.** Mejorar la uniformidad de riego mediante el rediseño de la cartilla de aspersión del pivote y sistematizar los cálculos en una hoja electrónica.
- C.** Evaluar la uniformidad de riego después de la reubicación adecuada de boquillas del pivote central según la cartilla de aspersión.
- D.** Determinar las láminas de riego requeridas por el cultivo y compararlas con las aplicadas durante la temporada de riego.

3.4 METODOLOGÍA

3.4.1 Determinación del estado actual de uniformidad de riego del pivote central

La determinación del estado actual de uniformidad se dividió en tres fases: mediciones antes de la prueba, durante la prueba y después de la prueba.

A. Mediciones antes de la prueba

Estas se centraron en la caracterización del pivote central. Esta caracterización se dividió en dos partes; la cartilla de aspersión vieja y el equipo de abastecimiento del pivote.

a. Para el equipo de abastecimiento se caracterizó lo siguiente:

- La marca de la bomba de agua “Hidromac”.
- El modelo de la bomba de agua “AZ 4x5x11A”.
- Caudal de la bomba de agua de 800 gpm a una presión de carga de 42.60 psi (determinada a través de la curva de desempeño de la bomba en la figura 32A).
- La marca del motor “John Deere”.
- El modelo del motor “4024TF270”.
- La potencia del motor es de 40 hp a 1,800 rpm (determinada a través de la curva de desempeño del motor en la figura 31A).

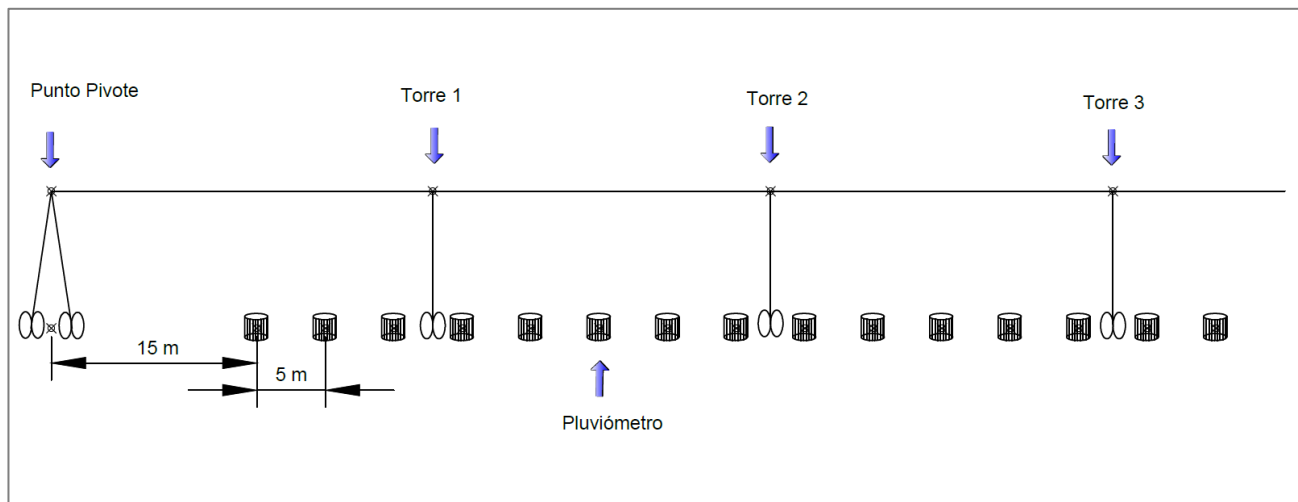
b. Para la cartilla vieja de aspersión se caracterizó lo siguiente:

- El número de torres del pivote que fueron 4.
- Longitud total del pivote que fue de 233.10 m.
- El número de aspersores que fueron 76.

- Espaciamiento promedio entre aspersores (m) de 3 m.
- Boquilla utilizada de marca Senninger.
- Calibre del regulador de presión en cada aspersor de 20 psi.
- El diámetro de la tubería lateral de 6 inch.
- La altura desde el suelo de la tubería lateral de 7 m.

B. Mediciones durante la prueba

- Se colocaron pluviómetros a lo largo del pivote; estos fueron de 30 cm de diámetro. Se colocó el primero a 15 m del punto pivote y después a cada 5 m según lo muestra la figura 19.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 19. Distribución de pluviómetros a lo largo de la tubería lateral del pivote.

- b.** Los pluviómetros fueron enumerados en correlativo ascendente partiendo del más cercano al punto pivote, así mismo se determinó la distancia respecto al punto pivote (m) de cada uno.
- c.** Durante la evaluación, se recolectaron los siguientes datos:
- Presión de aspersores a un tercio 1/3, dos tercios 2/3, tres tercios 3/3 de la longitud total del pivote en psi.
 - Revoluciones por minuto del motor de abastecimiento (rpm).
 - Presión en el punto pivote en psi.
 - Velocidad de viento en kilómetros por hora (km/h).
- d.** Así mismo, se midió la velocidad con la que trabaja el pivote durante la prueba; la velocidad porcentual y la velocidad lineal.

La velocidad porcentual es la fracción de tiempo que el pivote se detiene en un ciclo continuo de operación, a través de esto el pivote se mueve más lento o más rápido conllevando a regar diferentes láminas de riego. Para el cálculo se consideró el Tiempo en Movimiento del pivote (T_m) y el Tiempo en Reposo (T_r), es decir cuando no se mueve, por lo que se obtuvo:

$$Vel \% = \frac{T_m}{T_r + T_m} \times 100$$

$$Vel \% = \frac{6 \text{ seg}}{24 \text{ seg} + 6 \text{ seg}} \times 100 = 20 \%$$

Nota: cuando se riega con el pivote central, en el panel de control se coloca la velocidad porcentual deseada de trabajo. Durante la prueba la velocidad programada en el panel de control fue 20 % y a través de la medición directa en la torre de conducción más lejana se obtuvo una velocidad de 20 %, según lo calculado.

La velocidad lineal es el desplazamiento que tiene la torre más lejana respecto al tiempo, para esto se utilizó un metro graduado y se midieron 10 m de longitud y con un cronómetro se tomó el tiempo que le demoró al pivote en recorrerlo.

$$Vel\ lineal = \frac{Desplazamiento}{Tiempo} = \frac{10\ m}{10.52\ min} = 0.95\ m/min$$

- e. Se midió la precipitación provocada por el pivote y recogida por los diferentes pluviómetros colocados. Para esto se utilizó una probeta graduada de 2,000 ml y se midió cuánta agua recogió cada pluviómetro en milímetros.

C. Mediciones después de la prueba

- a. Se inició con el cálculo de las láminas recogidas por los diferentes pluviómetros, partiendo del volumen recolectado. Considerando el volumen recogido en milímetros y el diámetro del receptor de 30 cm se obtiene:

$$Lriego(mm) = \frac{Vol\ recolectado}{Area\ receptor} = \frac{Vol\ (ml)}{\pi \times D^2/4}$$

$$Lriego(mm) = \frac{1,790\ ml}{\pi \times (30\ cm)^2/4} = \frac{1,790\ cm^3}{\pi \times (30\ cm)^2/4} = 2.53\ cm = 25.30\ mm$$

Nota: este cálculo se realizó para todos los pluviómetros utilizados a lo largo de la tubería lateral del pivote.

- b. Con los datos de lámina, se calcularon los diferentes evaluadores de la calidad de riego, que son el coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (Cuh), la Uniformidad de Distribución (UD), Área Regada Adecuadamente (ARA), Área Regada Excesivamente (ARE) y Área Regada Insuficientemente (ARI). Los cálculos de

uniformidad se sistematizaron en una hoja electrónica, tomando como base las fórmulas presentadas a continuación.

- c. Para el Coeficiente de Uniformidad (Cuh) se inició a través de la construcción del cuadro 14.

Cuadro 14. Construcción cuadro para coeficiente de uniformidad.

No.	Dist (Si)	Lamina Vi	Vi*Si	Vi-V *Si
1	15	51.46	771.90	426.66
2	20	47.18	943.61	483.29
3	25	65.92	1648.14	1072.74
4	30	86.36	2591.04	1900.57
5	35	44.20	1547.34	741.78
43	225	3.68	827.61	4350.96
44	230	0.00	0.00	5293.65
Σ	5390	Σ	124055	46633.5

Fuente: elaboración propia, 2021.

Para la construcción del cuadro 14, se inició con los datos de lámina de los pluviómetros (Vi) y la distancia de estos respecto a la base del pivote (Dist), calculando la columna “Vi x Si” para cada pluviómetro, repitiendo el ejercicio matemático para los 44 pluviómetros utilizados. Se obtuvo a través de:

$$Vi \times Si = 15 \times 51.46 = 771.90$$

Después se calculó la lámina media ponderada (V) que consideró las sumatorias de las columnas “Vi x Si” y “Si”:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n Vi \times Si}{\sum_{i=1}^n Si} = \frac{124055}{5390} = 23.02 \text{ mm}$$

Se prosiguió al cálculo de la columna “ $|V_i - V| \times S_i$ ”, que consideró el valor absoluto de la diferencia de la lámina del pluviómetro (V_i) respecto al promedio ponderado (V), multiplicado por la distancia de ese pluviómetro a la base del pivote (S_i):

$$|V_i - V| \times S_i = |51.46 - 23.02| \times 15 = 426.66$$

Por último, se utilizó la ecuación propuesta por Heermann y Hein empleada por Pérez Leira et al. (2010) que utiliza los datos calculados a partir del cuadro:

$$CU_H = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |V_i - V| S_i}{\sum_{i=1}^n V_i \times S_i} \right] = 100 \left[1 - \frac{46633.5}{124055} \right] = 62.40 \%$$

Dónde:

CU_H = Coeficiente de Uniformidad de Heermann y Hein (%).

V_i = lámina de riego individual recogida por los pluviómetros (mm).

V = lámina media ponderada de riego durante la evaluación (mm).

S_i = distancia del pluviómetro V_i respecto al punto pivote (m).

d. Se calculó la Uniformidad de Distribución (UD) empleando la ecuación utilizada por Jiménez Espinoza (2010).

$$UD = \frac{V_{i_{25\%}}}{V} \times 100$$

Dónde:

UD = Uniformidad de Distribución (%).

$V_{i_{25\%}}$ = promedio ponderado de las láminas recogidas en el 25 % de pluviómetros con menor precipitación (mm).

V = promedio ponderado de las láminas recogidas en todos los pluviómetros (mm).

Para el cálculo del promedio ponderado del 25 % se ordenó de menor a mayor las láminas recogidas de los 44 pluviómetros y se colocó la posición en metros desde la base del pivote de dichas láminas. Se colocaron las 11 láminas correspondientes al 25 % del total de pluviómetros utilizados. El cuadro 15 se construyó para la determinación de la UD.

Cuadro 15. Construcción de cuadro para uniformidad de distribución.

Dist (Si)	Lamina Vi	Vi x Si
230	0.00	0.00
225	3.68	827.61
205	10.47	2146.12
220	12.10	2661.07
100	12.17	1216.65
185	13.86	2564.87
155	16.13	2499.79
195	18.04	3517.32
190	18.46	3507.77
210	18.74	3936.43
180	19.45	3501.41

Fuente: elaboración propia, 2021.

Se realizó la sumatoria de las columnas “Vi x Si” y “Dist (Si)” del cuadro 15 y se calculó la lámina media ponderada para el 25 % de las láminas menores.

$$\sum_{i=1}^n Dist (Si) = 2095$$

$$\sum_{i=1}^n Vi \times Si = 26379.09$$

$$V_{25\%} = \frac{\sum Vi \times Si}{\sum Dist (Si)} = \frac{23679.09}{2095} = 12.59 \text{ mm}$$

Por último, se utilizó la ecuación empleada por Jiménez Espinoza (2010).

$$UD = \frac{Vi_{25\%}}{V} \times 100 = \frac{12.59 \text{ mm}}{23.02 \text{ mm}} \times 100 = 54.69 \%$$

Nota: el cálculo del promedio ponderado en las láminas recogidas en todos los pluviómetros y en el 25 % con menor precipitación se realiza debido a que cada pluviómetro tiene una influencia diferente en el área de cobertura en el pivote central. Los pluviómetros que se encuentran más cercanos al punto pivote tiene una menor área de cobertura o influencia, siendo lo más lejanos los que tienen mayor área; por ello mismo sería incorrecto realizar una media aritmética de láminas porque las áreas de cobertura de los pluviómetros tienen diferente peso.

- e. Para la medición del área regada adecuadamente (ARA), área regada excesivamente (ARE) y área regada insuficientemente (ARI) se utilizó lo descrito por Montero et al, citados por Pérez Leira, et al. (2003).

El cálculo se inició con la construcción de un cuadro para las áreas regadas que determina el área de cobertura o influencia para cada pluviómetro utilizado en la prueba. El cuadro 16 muestra lo anterior.

Cuadro 16. Cálculo de áreas regadas según calidad.

No.	Dist (Si)	Lamina (Vi)	Radio mayor (m)	Radio menor (m)	Área cobertura (m ²)	Área
2	20	47.18	22.5	17.5	628.3	ARE
3	25	65.93	27.5	22.5	785.4	ARE
4	30	86.37	32.5	27.5	942.5	ARE

Fuente: elaboración propia, 2021.

El cuadro 16 inició con los datos de lámina (V_i) y distancia “Dist (S_i)” previamente calculados para cada pluviómetro. A continuación, se detalla el cálculo para el pluviómetro número 3, sin embargo, este procedimiento se repite para los demás pluviómetros:

Para el cálculo de la columna “Radio mayor”, se procedió así:

$$Radio\ mayor\ (3) = \frac{Dist\ (S_i)\ 3 + Dist\ (S_i)\ 4}{2} = \frac{25 + 30}{2} = 27.50\ m$$

Para el cálculo de la columna “Radio menor” se procedió así:

$$Radio\ menor\ (3) = \frac{Dist\ (S_i)\ 3 + Dist\ (S_i)\ 2}{2} = \frac{25 + 20}{2} = 22.50\ m$$

Para el cálculo de la columna “Área cobertura” se procedió así:

$$Area\ cobertura = \pi \times (Radio\ mayor^2 - Radio\ menor^2)$$

$$Area\ coberura = \pi \times [(27.50\ m)^2 - (22.50\ m)^2] = 785.40\ m^2$$

Como último paso se clasificó la lámina de riego atribuida al pluviómetro, esto en la columna “Área” según sea lámina adecuada (ARA), excesiva (ARE) o insuficiente (ARI). Para el cálculo se consideró la lámina media ponderada (V) de 23.02 mm calculada anteriormente para esta evaluación inicial. Para esto se utilizaron los siguientes criterios;

Se consideraron láminas excesivas (V_i) todas las que sean mayores de un 15 % de la lámina media ponderada (V). Es decir:

$$Si\ Lamina\ (V_i) > 1.15\ V \rightarrow Lamina\ (V_i) = "Excesivo"$$

$$1.15\ V = 1.15 \times 23.02\ mm = 26.46\ mm$$

Se consideraron láminas insuficientes (V_i) todas las que sean menores de un 15 % de la lámina media ponderada (V). La lámina que se encuentre entre el rango de excesivo y insuficiente se consideró como apropiada. Es decir:

$$\text{Si Lámina } (V_i) < 0.85 V \rightarrow \text{Lámina } (V_i) = \text{"Insuficiente"}$$

$$0.85 V = 0.85 \times 23.02 \text{ mm} = 19.56 \text{ mm}$$

Siendo la lámina (V_i) del pluviómetro número 3 de 65.93 mm y todas las láminas mayores a 26.46 mm según el criterio de lámina excesiva, a esta lámina le corresponde la categoría excesiva (ARE).

A continuación, se hizo la sumatoria de todas las áreas de cobertura correspondientes a las láminas apropiadas (ARA), excesivas (ARE) e insuficientes (ARI) y se presentó el resultado en porcentaje del total general sumando un 100 % entre las tres áreas.

$$\sum ARA = 54978 \text{ m}^2 = 32.23 \%$$

$$\sum ARE = 49028 \text{ m}^2 = 28.75 \%$$

$$\sum ARI = 66548 \text{ m}^2 = 39.02 \%$$

$$ARA + ARE + ARI = 170,554 \text{ m}^2 = 100 \%$$

- f. Por último, se elaboró una gráfica de distribución de láminas recolectadas en función de la distancia desde el centro del pivote, mediante una gráfica distancia-lámina.

3.4.2 Mejoramiento de la uniformidad de riego mediante el rediseño de la cartilla de aspersión del pivote y la sistematización de los cálculos en una hoja electrónica

Para el cumplimiento de este objetivo, se procedió en tres etapas; 1) investigación de los fundamentos del diseño de cartillas de aspersión, 2) la sistematización de cálculos a

través de una hoja electrónica, 3) el rediseño de la cartilla de aspersión del pivote central a través del uso de la hoja electrónica.

A. Fundamentos del diseño de cartillas de aspersión

Los fundamentos del diseño de las cartillas de aspersión en pivote central iniciaron con el diseño agronómico del cultivo, el cálculo del hidromódulo del pivote, la determinación de las láminas aplicadas del pivote según la velocidad porcentual de rotación, la ubicación de los aspersores a lo largo de la tubería lateral, el diseño de las boquillas, la evaluación de la uniformidad de las láminas proyectadas según las boquillas seleccionadas y el diseño hidráulico del pivote, todo en el orden citado.

- a. Para el cálculo del diseño agronómico, se estableció el área total bajo riego del pivote central. Siendo este un pivote móvil el área total bajo riego es la suma de todas sus posiciones de riego como se muestra en la figura 18 en el marco referencial.

$$Area\ total\ (ha) = \sum_{i=1}^n Posicion\ de\ riego\ (ha) = 82.80\ ha$$

Nota: posiciones de un pivote móvil. Un pivote móvil es de menor longitud que un pivote fijo. Generalmente son pivotes de 230 m de longitud en comparación de los fijos que son de 650 m. Por consiguiente, para poder regar una mayor cantidad de área el pivote móvil debe moverse a diferentes posiciones de riego, por lo que la suma de todas las posiciones de riego en hectáreas (ha) equivaldría al área total bajo riego. En total son 5 posiciones de riego del pivote.

- b. Se calculó el requerimiento de agua diaria de la caña conocida como lámina neta (L_n) que es igual la evapotranspiración máxima (E_{tmax}), condicionada por el clima (E_{to}) y su etapa de desarrollo (k_c). Se utilizó la siguiente ecuación:

$$Ln = Et_{max} = E_{to} \times kc$$

$$Ln = Et_{max} = 6.50 \text{ mm/dia} \times 0.90 = 5.90 \text{ mm/dia}$$

- c. Seguidamente se determinó la capacidad de suelo para retener agua a la profundidad del sistema radicular del cultivo conocida como lámina de agua aprovechable (LAA), siendo condicionado por sus propiedades físicas; capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PMP), densidad aparente (DAP) y profundidad radicular (ZR).

$$LAA = \frac{(CC - PMP)}{100} \times DAP \times ZR \times 10$$

$$LAA = \frac{(35.7 \% - 21.51 \%)}{100} \times 0.95 \text{ g/cm}^3 \times 45 \text{ cm} \times 10 = 60.70 \text{ mm}$$

- d. A continuación, se determinó la lámina a reponer después de cada riego, considerando que el cultivo no soporta más del 60 % de pérdidas de agua (déficit permitido de manejo o dpm), de lo contrario entraría en un punto no retorno de marchitamiento. Esto se conoce como lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA).

$$LARA = LAA \times DPM$$

$$LARA = 60.70 \text{ mm} \times 0.60 = 36.40 \text{ mm}$$

- e. Considerando el consumo diario de agua del cultivo en la Et_{max} , y la cantidad de agua aplicada al suelo con la LARA en un riego se obtuvo la frecuencia de riego (Fr) según las relaciones suelo-agua-planta. En sistemas de riego presurizado no siempre es posible fijar la frecuencia según necesidades del suelo-cultivo, por lo que se maneja una frecuencia ajustada según criterio de diseñador (Fr_{aj}).

$$Fr = \frac{LARA}{ET_{max}} \rightarrow Fr_{aj}$$

$$Fr = \frac{36.40 \text{ mm}}{5.90 \text{ mm/día}} = 6.20 \text{ días} \rightarrow 6 \text{ días}$$

- f. A continuación, se determinó la lámina bruta de agua en cada riego (L_b) que tome en consideración las pérdidas de agua provocadas por el método empleado (E_f), así mismo como la frecuencia de riego fijada por el diseñador (Fr_{aj}).

$$L_b = \frac{ET_{max}}{E_f} \times Fr_{aj}$$

$$L_b = \frac{5.90 \text{ mm/día}}{0.85} \times 6 \text{ días} = 41.30 \text{ mm}$$

- g. Se calculó la lámina bruta de riego diaria (L_{bd}) que es la relación entre la lámina bruta y la frecuencia de riego ajustada.

$$L_{bd} = \frac{L_b}{Fr_{aj}}$$

$$L_{bd} = \frac{41.30}{6} = 6.90 \text{ mm}$$

- h. Se estableció la jornada de riego (J_r), es decir el número de horas de operación diaria del pivote, siendo de 20 h.
- i. Utilizando los datos de área total (A_t), lámina bruta de riego diaria (L_{bd}) y jornada de riego (J_r), se calculó el caudal necesario para el proyecto (Q_p), a través de la siguiente ecuación:

$$Q_p = \frac{\text{Area total} \times (L_{bd})}{J_r}$$

$$Q_p = \frac{82.80 \text{ ha} \times 6.90 \text{ mm}}{20 \text{ h}} = \frac{828,000 \text{ m}^2 \times 0.0069 \text{ m}}{20 \text{ h}} = 285 \text{ m}^3/\text{h} = 1,254 \text{ gpm}$$

- j. Se calculó el hidromódulo (Hm) requerido del pivote central que es igual al caudal del proyecto (Qp),

$$Hm = Q_p = 285 \text{ m}^3/\text{h} = 1,254 \text{ gpm}$$

- k. Considerando el dato del hidromódulo requerido se calculó el diámetro de la tubería lateral del pivote (D), para esto se utilizó la ecuación de continuidad. Esta ecuación considera el caudal necesario para transportar en la tubería (Q) que es equivalente al hidromódulo y la velocidad del flujo (V). Las velocidades de flujo establecidas para diseños más económicos se presentan en los rangos desde 0.50 m/s a 3 m/s según Sotelo Avila (1994). Para el cálculo de la tubería del pivote se utilizó una velocidad de flujo media de 1.25 m/s.

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times V}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 285 \text{ m}^3/\text{h}}{\pi \times 1.25 \text{ m}/\text{seg}}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.0791 \text{ m}^3/\text{seg}}{3.1416 \times 1.25 \text{ m}/\text{seg}}} = 0.2839 \text{ m} = 11.20 \text{ inch}$$

Nota 1: si bien la determinación del diámetro de tubería es parte del diseño hidráulico, en el caso de rediseño la cartilla de aspersión se debe calcular en esta fase, debido debe establecerse el hidromódulo del pivote para poder continuar con los demás cálculos.

Nota 2: los diseños de cartillas de aspersión emplean criterios ideales que no siempre son posibles aplicarlos al momento de rediseñar un pivote. En la situación de rediseño, la modificación del diámetro de la tubería lateral es muy complicada debido a conllevar mayores costos. En estos casos se opta por modificar el hidromódulo del pivote (caudal del proyecto) para adaptarlo al diámetro de tubería, siendo el criterio de adaptación una velocidad de flujo interno que de acuerdo a Sotelo Ávila no debe sobrepasar los 3 m/s.

Considerando la ecuación inicial para el cálculo del diámetro la tubería, se despeja para la variable Velocidad (V) y se obtiene:

$$V = \frac{Q}{\pi D^2 / 4}$$

El pivote utilizado tuvo una tubería fija de **6 inch**, por lo que un caudal de **700 gpm** o su equivalente de 159.09 m³/h consiguió una velocidad de 2.42 m/s menor a los 3 m/s máximos permisibles según Sotelo Ávila (1994).

$$V = \frac{700 \text{ gpm}}{\pi \times (6 \text{ pulg})^2 / 4} = \frac{0.0441 \text{ m}^3/\text{seg}}{3.1416 \times (0.1524 \text{ m})^2 / 4} = 2.42 \text{ m/s}$$

Nota: para efectos del diseño del pivote, el diseño agronómico únicamente sirve para dimensionar el hidromódulo del pivote, es decir la capacidad de riego que tenga el pivote. A partir de esta capacidad ya se puede realizar cambios en la lámina aplicada al cultivo. Considerando lo anterior, aquí se baja el caudal para ajustarse a la capacidad de la tubería lateral.

- I. A continuación, se calculó la lámina mínima de riego cuando el pivote se mueve a mayor velocidad (100 % velocidad porcentual). Para esto se utilizó el dato del hidromódulo modificado por el diseñador de 700 gpm para ajustarse a las 6 inch de diámetro de tubería lateral, el área de riego del pivote según su longitud total de 233.10 m y el tiempo que tarda el pivote en dar una vuelta completa.

Conociendo la longitud total del pivote de 233.10 m se determina el área de riego a través de:

$$\text{Area riego} = \pi \times \text{longitud}^2 = 3.1416 \times (233.1 \text{ m})^2 = 170,700.40 \text{ m}^2$$

Para conocer el tiempo de riego a velocidad máxima (100 %), se partió de la velocidad lineal medida en 10 m durante la evaluación inicial de 0.95 m/min a un 20 % de velocidad porcentual, esto en la torre de conducción más lejana. Por lo que la velocidad porcentual al 20 % es:

$$Vel\ linear\ al\ 100\ \% = \frac{0.95\ m/min \times 100\ \%}{20\ \%} = 4.75\ m/min$$

A continuación, se determinó el recorrido total de la torre de conducción donde se hizo la medición de esta velocidad. Esta torre se encontró a 215.36 m de la base del pivote y considerando que el recorrido fue de forma circular, se obtiene:

$$Recorrido\ total\ torre\ (m) = 2 \times \pi \times distancia = 2 \times 3.1416 \times 215.36\ m = 1.353.14\ m$$

Conociendo la velocidad máxima de la torre de 4.75 m/min y la longitud a desplazar de 1353.14 m se obtuvo el tiempo que tarda en recorrer una vuelta de 360 ° es decir:

$$Tiempo\ riego = \frac{Distancia}{Velocidad} = \frac{1,353.14\ m}{4.75\ m/min} = 284.87\ min = 4.75\ h$$

Finalmente, considerando la ecuación propuesta por Chu (1980), despejando la variable lámina bruta se obtiene:

$$Lamina\ bruta = \frac{Hidromódulo \times Tiempo\ Riego}{Area\ de\ riego}$$

$$Lamina = \frac{700\ gpm \times 4.75\ h}{170,700.40\ m^2} = \frac{159.09\ m^3/h \times 4.75\ h}{170,700.40\ m^2} = 0.00442\ m = 4.42\ mm$$

Nota: el término lámina mínima se le atribuye al pivote central cuando opera a su mayor velocidad, esto debido a que el pivote siempre se encuentra descargando el mismo caudal y la forma para modificar la lámina de riego es modificando su velocidad. Una lámina menor a la calculada en este apartado ya no es posible a menos que se apague por completo el pivote.

m. Con el dato de lámina mínima de riego de 4.42 mm cuando la velocidad de rotación es mayor (100 % velocidad) y el tiempo de rotación de 4.75 h, se calcularon las láminas de riego y tiempos de rotación cuando la velocidad porcentual es menor. Esto se

realizó a través de una regla de tres inversamente proporcional como lo indica Traxco (s.f). Los resultados se muestran en el siguiente cuadro 17:

$$Rotación\ pivote = \frac{100\% \times 4.75\ h}{Vel\ deseada} = \frac{100\% \times 4.75\ h}{50\%} = 9.50\ h$$

$$Lamina\ pivote = \frac{100\% \times 4.40\ mm}{Vel\ deseada} = \frac{100\% \times 4.40\ mm}{50\%} = 8.80\ mm$$

Cuadro 17. Láminas de riego del pivote central.

VUELTA DE 360 GRADOS		
Velocidad rotación (%)	Rotación (h)	Lámina de Riego (mm)
100	4.75	4.42
50	9.50	8.80
25	19.0	17.70

Fuente: elaboración propia, 2021.

- n. Como siguiente paso, se hizo la distribución de aspersores a lo largo de la tubería lateral para un espaciamiento constante entre sí en la medida de lo posible, para alcanzar un traslape adecuado según Gaudi et al. (2007). Para esto se eligió un distanciamiento apropiado entre aspersores (Dea) que dependió de dos factores; 1) el diámetro de mojado del aspersor y 2) el distanciamiento entre salidas del pivote central para instalación de aspersores.

El aspersor utilizado fue de Marca Nelson, modelo R3030 Rotator, que de acuerdo al fabricante tiene un diámetro de mojado (Dm) de 15 m a una presión de 15 psi, y con un distanciamiento entre aspersores de 3 m, se obtiene un traslape de;

$$Traslape(\%) = \frac{Dm/2}{Dea} \times 100 = \frac{15\ m/2}{3\ m} \times 100 = 250\ %$$

El distanciamiento entre salidas para instalación de aspersores viene predeterminado por el fabricante por lo que se pueden encontrar salidas a distancias de 1 m, 1.50 m, 2 m, 2.50 m, 3 m, etc., entre cada una de ellas, siendo muy variable. Por tal razón y partiendo de la distancia entre aspersores para un traslape adecuado, se deben distribuir los aspersores de forma que queden a distancias más o menos a la apropiada, que en este caso fue de 3 m. Sin embargo, no todos los aspersores quedarán a 3 m entre ellos, algunos quedarán a 2.50 m, otros a 3.50 m, otros a 1.50 m, por tal motivo se procede al siguiente paso.

- o. Para verificar la distancia entre aspersores de la distribución se utilizó el coeficiente de variación (Brown 1998). Primeramente, se construyó el cuadro 18 mostrado a continuación.

Cuadro 18. Cálculo del coeficiente de variación.

Numero de aspersor	Dist base-asp	Dist entre aspersor	Xi-X	(Xi-X) ²
2	13	3.3	0.16	0.03
3	16.30	3.3	0.16	0.03
4	19.60	3.3	0.16	0.03

Fuente: elaboración propia, 2021.

El cuadro 18 es un conjunto de datos parciales de los 73 aspersores distribuidos. La construcción del cuadro inició con los datos iniciales del número de aspersor, la distancia entre la base del pivote-aspersor y la distancia entre los aspersores. Primeramente, se inició con el cálculo del promedio (X) de la distancia entre los 73 aspersores siendo:

$$\text{Promedio entre aspersores} = \frac{\sum \text{Dist entre asp}}{N (\text{cantidad de asp})} = \frac{226.22 \text{ m}}{73} = 3.14 \text{ m}$$

A continuación, se ejemplifica la construcción del cuadro para el aspersor número 2. Se calculó la columna “ $X_i - X$ ” de la siguiente forma:

$$X_i - X = \text{Dist entre asp} - \text{Promedio } (X) = 3.30 \text{ m} - 3.14 \text{ m} = 0.16 \text{ m}$$

La columna “ $(X_i - X)^2$ ” se calculó de la siguiente manera:

$$(X_i - X)^2 = (0.16 \text{ m})^2 = 0.03$$

Se calculó la desviación estándar considerando los 73 datos de la tabla completa, de esta forma:

$$\text{Desviación } (S) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}{N}} = \sqrt{\frac{30.12}{73}} = 0.64 \text{ m}$$

Por último, se calculó el coeficiente de variación (CV) para el distanciamiento entre los 73 aspersores utilizados en el pivote:

$$C.V = \frac{\text{Desviación } (S)}{\text{Promedio } (X)} \times 100 = \frac{0.64 \text{ m}}{3.14 \text{ m}} \times 100 = 20.45 \%$$

Nota: el cálculo del coeficiente de uniformidad se realizó para verificar una distribución uniforme entre aspersores.

- p. Luego se procedió a diseñar las boquillas utilizadas en los aspersores ya distribuidos. Primeramente, se inició con la construcción del cuadro 19 mostrado a continuación.

Cuadro 19. Cálculo de diseño de boquilla.

Asp	Dist base-asp	Radio mayor (m)	Radio menor (m)	Área cobertura (m ²)	Caudal requerido (lph)	Caudal seleccionado (lph)	Número de boquilla
2	13	14.65	10	360.10	336	343	15
3	16.30	17.95	14.65	338	315	343	15
4	19.60	21.25	17.95	406.40	379	388	16

Fuente: elaboración propia, 2021.

El cuadro tomo como base los datos del número de aspersor (columna “Asp”), distancia desde la base del pivote al aspersor (columna “Dist base-asp”). A continuación, se describe el diseño de boquilla para el aspersor número 3:

Para el cálculo de la columna “Radio Mayor” se procedió así:

$$Radio\ mayor\ (3) = \frac{Dist\ 3 + Dist\ 4}{2} = \frac{16.3m + 19.6m}{2} = 17.95\ m$$

Para el cálculo de la columna “Radio Menor” se procedió así:

$$Radio\ menor\ (3) = \frac{Dist\ 3 + Dist\ 2}{2} = \frac{16.3m + 13m}{2} = 14.65\ m$$

Para el cálculo de la columna “Área cobertura” se procedió así:

$$Area\ cobertura = \pi \times (Radio\ mayor^2 - Radio\ menor^2)$$

$$Area\ coberura = \pi \times [(17.95\ m)^2 - (14.65\ m)^2] = 338.0\ m^2$$

A continuación, se calculó el caudal requerido por el aspersor (Qa). El cálculo consideró el área de cobertura del aspersor (Ac), la lámina a aplicar (lb) de 4.42 mm y el tiempo de rotación del pivote (Tr) de 4.75 h, siendo estos los dos últimos datos calculados cuando el pivote se mueve a su mayor velocidad (100 %), es decir:

$$Qa = \frac{Ac \times Lb}{Tr} = \frac{338.0 \text{ m}^2 \times 4.42 \text{ mm}}{4.75 \text{ h}} = \frac{338.0 \text{ m}^2 \times 0.0044 \text{ m}}{4.75 \text{ h}} = 0.315 \text{ m}^3/\text{h} = 315 \text{ L/h}$$

Seguidamente, se seleccionó la boquilla del catálogo del fabricante (cuadro 41A). La boquilla a utilizar debe ser acorde a la presión de trabajo del aspersor que para el caso de este diseño se utilizó una presión de 15 psi en todos los aspersores a través del uso de reguladores de presión.

Cuadro 20. Segmento de catálogo de boquilla Nelson.

Numero de boquilla	15 psi
15	342.60
16	388.20

Fuente: elaboración propia, 2021.

Considerando que el caudal requerido (Q_r) es de 315 L/h en el aspersor número 3, el cuadro muestra una sección del catálogo de fabricante con tres tipos de boquillas que trabajan a 15 psi. Se debió realizar la diferencia entre los caudales de las boquillas disponibles (Q_d) y el caudal requerido, seleccionando la boquilla donde la diferencia tienda a cero, es decir:

$$\text{Boquilla 15} = Q_r - Q_d = 315 \text{ L/h} - 342.60 \text{ L/h} = -27.60 \text{ L/h}$$

$$\text{Boquilla 16} = Q_r - Q_d = 315 \text{ L/h} - 388.20 \text{ L/h} = -73.20 \text{ L/h}$$

Como se observa en el cálculo, la boquilla número 15 provee el caudal más cercano al requerido con una diferencia absoluta de 27.60 L/h, acercándose a 0, en comparación de la boquilla 16 que tiene una diferencia absoluta de 73.20 L/h. Para este diseño se seleccionó la boquilla número 15 para el aspersor número 3, por lo que la columna “Numero de boquilla” lleva el número 15 y en la columna de “caudal seleccionado” los 342.60 L/h $\approx$ 343 L/h descargados por la boquilla.

Nota: el hidromódulo original fue de 700 gpm, este caudal fue utilizado para realizar el diseño de boquillas. Sin embargo a través de la selección las boquillas, el hidromódulo final del pivote es la suma de cada caudal individual por boquilla según selección es decir.

$$\sum_{i=1}^n \text{Caudal de boquillas} = 717.5 \text{ gpm} = 45.27 \text{ L/s}$$

- q. Se calculó la lámina de riego en cada aspersor (la), considerando el caudal seleccionado (Qas), el tiempo de rotación (Tr) y el área de cobertura (Ac) del aspersor. Este paso es muy importante debido a que las boquillas seleccionadas no siempre tendrán coincidencia exacta al caudal requerido, por lo que regará una diferente lámina y por lo tanto tendrán un efecto de menor uniformidad de riego teórica esperada, Considerando los datos del aspersor número 3 se tiene:

$$La = \frac{Qas \times Tr}{Ac} = \frac{315 \text{ lph} \times 4.75 \text{ h}}{338.0 \text{ m}^2} = \frac{0.315 \text{ m}^3/\text{h} \times 4.75 \text{ h}}{338.0 \text{ m}^2} = 0.00442 \text{ m} = 4.42 \text{ mm}$$

- r. Considerando los datos de las láminas de riego calculadas para los 73 aspersores con los caudales de las boquillas seleccionadas, y la distancia de los aspersores respecto a la base del pivote, se evaluó la uniformidad de riego teórica esperada para el diseño.

Para ello se utilizó la metodología del inciso 4.1.3, que utilizó los evaluadores del coeficiente de uniformidad (CUh), uniformidad de distribución (UD), área regada adecuadamente (ARA), área regada excesivamente (ARE) y área regada insuficientemente (ARI).

- s. Finalmente, se calculó la presión requerida al inicio de la tubería lateral, es decir en la base del pivote (P). Para ello, se consideró la presión requerida en el aspersor crítico (Pe), el más lejano respecto al punto pivote, la diferencia de nivel entre la base del pivote y el aspersor crítico (Δh) y las pérdidas por fricción en la tubería lateral (Hf), tal como lo indica Fernández (2012).

$$P = P_e + hf_{lateral} + hf_{menores} + \Delta h$$

La presión de diseño del aspersor crítico (P_e) fue de 15 psi, sin embargo, para el cálculo hidráulico se le deben sumar 5 psi más, esto por recomendación del fabricante para un correcto funcionamiento de los reguladores de presión, por lo que se obtiene:

$$P_e = \text{Presion nominal} + \text{Presion de margen de seguridad} = 15 \text{ psi} + 5 \text{ psi} = 20 \text{ psi}.$$

Las pérdidas por fricción se calcularon en cada tramo entre aspersores (H_f) utilizando la ecuación de Hazen-Williams presentada por Martin et al. (2011). En esta ecuación se consideró el caudal del tramo en lts (Q), el diámetro de la tubería en milímetros (d), el coeficiente de rugosidad (C) del aluminio que es el material de fabricación y la longitud del tramo en metros (L). A continuación, se ejemplifica el cálculo de un tramo del pivote. El catálogo de tuberías para el pivote central se encuentra en el cuadro 42A.

$$H_{ft} = \frac{1.21 \times 10^{10}}{d^{4.87}} \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} \times L = \frac{1.21 \times 10^{10}}{(152.4 \text{ mm})^{4.87}} \times \left(\frac{34.14 \text{ lps}}{130}\right)^{1.852} \times 4.3 \text{ m} = 0.15 \text{ psi}$$

Con el cálculo de las pérdidas por fricción de todos los tramos del pivote, se debe realizar la sumatoria para obtener las pérdidas totales generales (hf generales) en el lateral, es decir;

$$H_f \text{ generales} = \sum_{i=1}^n H_f \text{ por tramo} = 7.25 \text{ psi}$$

Se estimaron las pérdidas por fricción menores considerando un 15 % de las perdidas generales, es decir;

$$H_f \text{ menores} = 0.15 \times H_f \text{ generales} = 0.15 \times 7.25 \text{ psi} = 1.08 \text{ psi}$$

Considerando que la altura del pivote es de 7 m (Δh) sobre el suelo, la presión en la base del pivote (P) deber ser:

$$P = P_e + hf_{lateral} + hf_{menores} + \Delta h = 20 \text{ psi} + 7.25 \text{ psi} + 1.08 \text{ psi} + 9.94 \text{ psi} = 38.2 \text{ psi}$$

B. Sistematización de cálculos en una hoja electrónica

La sistematización de cálculos utilizó de base matemática las fórmulas descritas en los fundamentos de diseño. En el anexo se encuentra una guía de uso de la hoja electrónica. Se elaboró siguiendo los pasos detallados a continuación:

- a. Se creó la hoja de inicio con el nombre de RECAASPICE, que hace referencia a las primeras dos letras del enunciado “Rediseño de cartillas de aspersión para pivote central”.
- b. Se crearon 3 hojas para el dimensionamiento del sistema según diseño agronómico. Coloreando de amarillo las celdas de la hoja que pueden ser modificadas por el usuario. Las hojas se nombraron como “Agro1, Agro2 y Agro3”.
- c. Se crearon dos hojas, “HIDRO1 E HIDRO2”, específicamente para el cálculo del hidromódulo del pivote considerando los elementos agronómicos de la sección anterior.
- d. Se crearon las hojas, “Lamina1” y “Lamina2”, para el cálculo de la lámina mínima del pivote cuando se desplaza a su mayor velocidad, es decir al 100 % de velocidad porcentual. El pivote al estar descargando la misma cantidad de agua cuando se desplaza a su mayor velocidad tiene una lámina mínima que incrementará a medida que su rotación sea más lenta.
- e. Se creó una hoja con el nombre de “inventario”, donde el usuario debe realizar la distribución de aspersores deseada a lo largo de la tubería lateral, indicando a que distancia desea cada aspersor uno del otro. Así también debe indicar el diámetro de tubería del pivote en cada sección de su longitud, este dato es de utilidad en el cálculo

de la presión de operación del lateral del pivote. Así mismo, se colocó un hipervínculo donde el usuario puede evaluar la equidistancia entre aspersores a través del coeficiente de variación.

- f. Se creó una hoja llamada “diseño de boquillas”, donde el usuario puede seleccionar las boquillas que crea conveniente para la descarga de la lámina de riego. Para la selección de la boquilla adecuada el usuario debe observar la columna “caudal requerido”. siendo este en litros por hora (L/h), y en la columna “numero de boquilla” debe seleccionar un número de boquilla que su caudal sea lo más cercano al requerido, para esto ayudarse de la columna “diferencia”, donde se muestra la diferencia de L/h entre caudal requerido y seleccionado, que debe aproximarse a 0 idealmente. A continuación se muestra la selección de boquilla en el cuadro 21.

Cuadro 21. Selección de la boquilla en hoja electrónica.

Caudal requerido (L/h)	Caudal seleccionado (L/h)	Número de boquilla	Diferencia
266	293	14	26
336	343	15	7

Fuente: elaboración propia, 2021.

- g. En la misma hoja “diseño de boquilla”, se agregó una columna de lámina proyectada para cada aspersor con su respectiva posición a lo largo de la tubería lateral.
- h. Se creó una hoja llamada “Evaluación Uniformidad”, que tomó como base la data de láminas proyectadas y su posición respecto a la longitud del pivote, todo esto en la hoja “diseño de boquilla” y efectúa una evaluación de uniformidad según los evaluadores de coeficiente de uniformidad (CUh), uniformidad de distribución (UD), área regada adecuadamente (ARA), área regada excesivamente (ARE) y área regada insuficientemente (ARI), siendo estos evaluadores empleados por Pérez Leira et al. (2015).

- i. Se creó una hoja llamada “Diseñohidráulico” para determinar la presión de operación del lateral al inicio del punto pivote. Aquí se determinaron las pérdidas por fricción ocurridas en cada tramo entre aspersores, desde el más lejano del punto pivote hacia el más cercano.
- j. Para finalizar se crearon las últimas dos hojas con los nombres de “Informe final” y “Carta de aspersión”, que son un resumen de todos los cálculos de la cartilla de aspersión listos para su impresión en hojas físicas.

3.4.3 Evaluación de la uniformidad de riego final después de la reubicación adecuada de boquillas del pivote central según la cartilla de aspersión

Para el cumplimiento de este objetivo se procedió de la siguiente manera:

- A. Se llevaron a cabo los trabajos operativos del cambio de la carta de aspersión (boquillas, reguladores de presión, distribución de aspersores) según el rediseño de cartilla.
- B. Se evaluó la uniformidad del pivote en campo utilizando la metodología de evaluación discutida en el inciso 4.1, según los evaluadores coeficiente de uniformidad (CUh), uniformidad de distribución (UD), área regada adecuadamente (ARA), área regada excesivamente (ARE) y área regada insuficientemente (ARI).
- C. Se realizó una comparación entre la uniformidad de riego inicial y final del pivote central. Para ello se utilizaron dos tipos de análisis:
 - Gráfico de columnas para cada evaluador de uniformidad.
 - Distribución de láminas recolectadas en función de la distancia desde el centro del pivote, mediante una gráfica distancia-lamina.

3.4.4 Determinación de las láminas de riego requeridas por el cultivo y su comparación con las aplicadas durante la temporada de riego

Para el cumplimiento de este objetivo se utilizaron los criterios del diseño agronómico establecidos según la definición de Camejo Barreiro et al. (2017).

A. Láminas de riego requeridas por el cultivo en la temporada de riego

- a. Se estableció el inicio de la temporada de riego cuando la caña de azúcar fue cosechada respecto a la temporada anterior y el fin de temporada se definió al momento de iniciar las lluvias de la época lluviosa anual. La duración de la temporada de riego fue el número de días transcurridos desde la fecha corte del cultivo anterior y la última fecha al momento de iniciar las lluvias.
- b. Se recopiló información meteorológica de la estación cercana para la temporada de riego. La estación se ubicó a 4.80 km de distancia de finca La Máquina donde se realizó el estudio. La información recopilada se tomó del 13 de diciembre del 2019 al 17 de mayo de 2020, siendo el período de interés en este estudio:
 - Temperatura en grados centígrados (°C).
 - Radiación solar en vatios por metro cuadrado (W/m^2).
 - Humedad relativa en porcentaje (%).
 - Velocidad de viento en kilómetros por hora (km/h).

En el cuadro 22 se muestran los datos de la estación meteorológica utilizada para la toma de datos clima para el análisis de evapotranspiración.

Cuadro 22. Datos de la estación meteorológica “La Máquina”, del Instituto de Cambio Climático (ICC).

La Maquina	
Código	34
Coordenadas	13.90, -90.33
Altitud	17
Estrato	Litoral
Fecha	23/02/2021 20:30
Temperatura	25.38 °C
Radiación	0.27 w/m ²
Humedad Relativa	81.83 %
Precipitación	0.00 mm
Velocidad del viento	6.06 km/h
Mojadura	0 unidades
Dirección del viento	4.20 °az

Fuente: elaboración propia, 2021.

- c. Se calcularon las evapotranspiraciones de referencia. Para esto se tabularon las variables recopiladas de la estación meteorológica La Máquina en el software “ETo calculator” desarrollado por FAO. El programa tiene como fundamento de cálculo la ecuación de Penman-Montieth y da resultados en mm/día para toda la temporada de riego.
- d. Se construyó la curva de k_c para el cultivo de caña de azúcar considerando la duración de la etapa fenológica (días después del corte DDC) y el k_c para cada etapa según lo propuesto por Juárez (2021).

Cuadro 23. Valores de kc según etapa fenológica en el cultivo de caña de azúcar.

Etapa	Días después del corte (DDC)	Kc
Iniciación	0-30	0.30
Macollamiento	30-90	0.65
Elongación I	90-170	1
Elongación II	170-320	1
Maduración	320-365	0.70

Fuente: elaborado con base en Juárez (2021).

- e. Se calculó el kc específico para cada día durante la temporada de riego. Para ello se extrajo la información generada con la curva de kc, relacionando los días después de corte y el kc resultante.
- f. Se determinó el consumo de agua diario requerido por el cultivo, a través de la expresión:

$$ET_c = ET_o \times K_c$$

Dónde:

ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm/día).

ET_o = evapotranspiración de referencia (mm/día).

K_c= coeficiente único del cultivo, incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo (adimensional).

- g. Se realizaron las sumatorias del requerimiento hídrico por etapa fenológica en la temporada de riego previamente establecida.

B. Láminas aplicadas al cultivo de caña de azúcar en la temporada de riego del 13/12/2019 al 17/05/2020

- a. Se buscaron los registros de riego de finca La Máquina para el área de influencia del pivote central y se contabilizaron los riegos aplicados en la temporada en cada etapa fenológica.
- b. Para cada riego aplicado se verificó la cantidad de agua aplicada (mm) según los registros de la finca.
- c. Se determinó la lámina bruta total aplicada según el producto del número de riegos y la lámina por evento de riego, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Lb = No\ Riegos \times Lam/evento$$

Ecuación 8 Lámina bruta de riego.

Dónde:

Lb = lámina bruta de riego aplicado considerando las pérdidas ocurridas en el sistema (mm).

Numero de riegos = la cantidad de riegos aplicados según registro de fincas (adimensional).

$Lam/evento$ = cantidad de agua aplicada por cada riego (mm).

- d. Se estimó la lámina neta total, descontando las pérdidas ocurridas por el pivote central a través de la siguiente expresión; la eficiencia se consideró un 80 %.

$$Ln = Lb \times Ef$$

Ecuación 9. Lámina neta de riego.

Dónde

Ln = lámina neta aplicada descontando las pérdidas ocurridas por eficiencia del sistema.

Lb = lámina bruta aplicada.

Ef = eficiencia de riego del método empleado.

- e. Por último, se compararon las láminas por medio del factor K de cumplimiento de lo aplicado respecto a lo requerido según etapa fenológica a través de la siguiente expresión:

$$\text{Factor } K = \frac{La}{Lr}$$

Ecuación 10. Factor K.

Dónde:

Factor K = cumplimiento de lámina aplicada respecto a lo requerido.

La = lámina aplicada (mm).

Lr = lámina requerida (mm).

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1 Estado inicial de uniformidad de riego del pivote central

Se determinó el estado inicial de uniformidad de riego del pivote. Durante la fase de campo o evaluación de la uniformidad se tomaron lecturas de las condiciones de operación respecto a presiones alcanzadas, revoluciones del motor, entre otras. En el cuadro 24 se detallan las condiciones operativas durante la evaluación inicial de uniformidad.

Cuadro 24. Condiciones operativas durante la evaluación inicial de la uniformidad del equipo.

Condiciones de evaluación		
Revoluciones por minuto (rpm) del motor		1,800 rpm
Presión (psi) punto pivote		35 psi
Presión de operación (psi)	Primer tramo	17 psi
	Segundo tramo	17 psi
	Tramo final	12 psi
Velocidad viento (km/h)		3.80 km/h
Temperatura (C°)		27 °C
Hidromódulo (medido con caudalímetro)		800 gpm
Velocidad de operación	Velocidad porcentual	20 %
	Velocidad lineal	1.16 m/min

En el cuadro 24, se observan las condiciones de operación del equipo de bombeo y el pivote. Se observa que el motor estuvo trabajando a 1,800 revoluciones por minuto (rpm), una presión en la entrada de la tubería lateral del pivote de 35 psi, y una presión al final de la tubería de 12 psi (un diferencial de presión del 29 % que significa un riego no uniforme).

La prueba se realizó en horas de la mañana para minimizar el efecto del viento sobre la uniformidad de riego, pues según Cameiro et al. (2017), a mayor velocidad de viento la uniformidad de riego es menor, y el propósito en esta parte fue determinar el desempeño del pivote y no así la variación que pueda ocurrir por efectos del viento; se realizó de 7:25 am a 9:25 am para una duración total de 1.75 h. La velocidad del viento medida durante la prueba fue de 3.80 km/h.

El pivote se trabajó a una velocidad del 20 % debido a que durante la evaluación se aprovechó para regar la caña de azúcar en su fase de iniciación aplicando una lámina de 22 mm. La temperatura durante la prueba fue de 27 °C. Se observa en el cuadro 24 que el caudal del pivote fue de 800 gpm medido con caudalímetro, las presiones de operación en los aspersores tomados a uno, dos y tres tercios de la longitud del pivote; considerando que los reguladores de presión de la cartilla de aspersión vieja fueron de 20 psi, se esperaba encontrar presiones de 20 psi, sin embargo las lecturas fueron de 17 psi, 17 psi y 12 psi en los diferentes tramos.

La figura 20, muestra la distribución de láminas recogidas en los diferentes pluviómetros durante la evaluación.

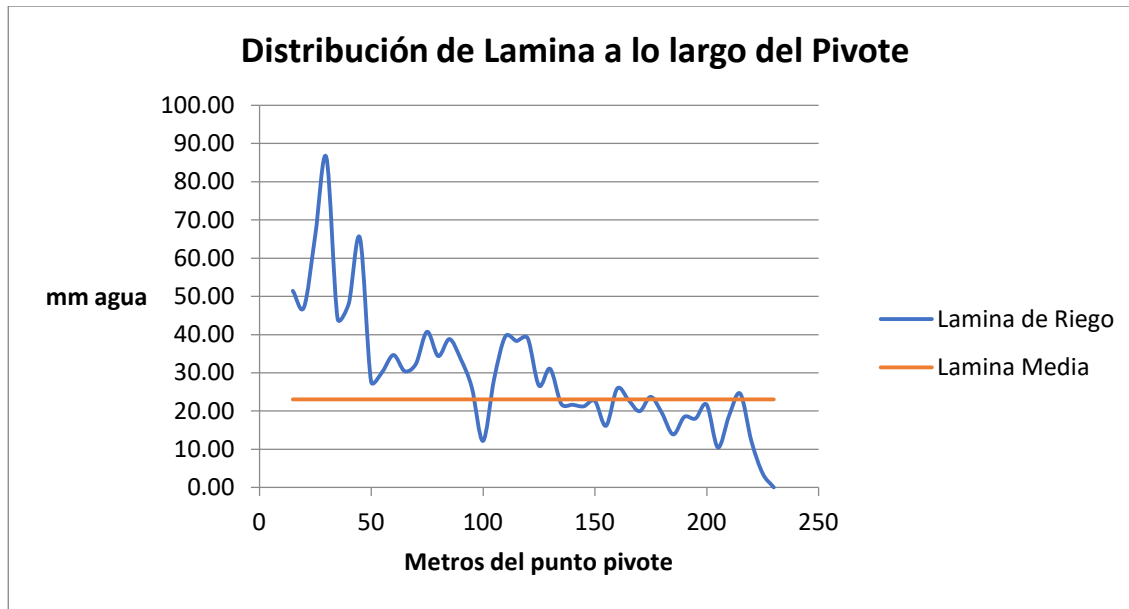


Figura 20. Distribución de láminas obtenidas en la evaluación inicial de la uniformidad.

Se observa que en los primeros 100 m de la base del pivote las láminas superaron la lámina media, sin embargo, a distancias más lejanas éstas cayeron por debajo de la lámina media. Se obtuvo la mayor lamina de 86.37 mm a los 30 m del punto pivote y una lámina menor de 0 mm a los 230 m de la base. Los datos brutos por pluviómetro durante la prueba se pueden revisar en el cuadro 39A.

Por otra parte, se puede apreciar una relación entre el porcentaje de área regada insuficientemente y la distribución de láminas. Considerando que los pluviómetros que se encuentran más alejados de la base del pivote tienen una mayor área de cobertura y en esa zona se dieron disminuciones en láminas de riego, es decir menores a la lámina media, se puede inferir que gran cantidad de área fue regada insuficientemente. A esta inferencia únicamente le faltaría el cálculo para determinar exactamente cuánto fue el área regada insuficientemente, así también como el excesivo y el adecuado, dichos resultados se muestran en el cuadro 25 a continuación.

Cuadro 25. Evaluadores de la calidad de riego determinados en el pivote.

Resultados de la Evaluación	
Lámina media recogida (mm)	23.02 mm
Coeficiente uniformidad Herman y Hein (%)	62.40 %
Uniformidad de distribución (%)	54.70 %
Área regada adecuadamente ARA (%)	32.23 %
Área regada excesivamente ARE (%)	28.75 %
Área regada insuficientemente ARI (%)	39.02 %

En el cuadro 25, la evaluación conllevó a una lámina media de 23.02 mm, obtenida con una operación del 20 % de velocidad de rotación del pivote, la lámina esperada con este porcentaje de velocidad fue de 22.10 mm. Así mismo, se puede apreciar un coeficiente de uniformidad (Cuh) del 62.40 %, significando una mala uniformidad según los criterios expuestos por Palacios Mondaca et al. (2017), pues ellos indican que un Cuh por debajo del 80 % se considera malo en una escala de 0 % a 100 %. La uniformidad de distribución fue de 54.70 %, que de acuerdo a Tun citado por Palacios Mondaca et al. (2017), se requiere un mínimo del 80 % para ser aceptable.

También se hizo el análisis de áreas y se pudo determinar que únicamente el 32.23 % del área se riega adecuadamente, el 28.75 % del área se riega excesivamente, y un 39.02 % se riega insuficientemente, es decir, no recibe ni la cantidad media programada por el equipo.

Estos malos resultados se obtuvieron derivado a una serie de situaciones encontrados en el pivote en cuanto al equipo de bombeo y su cartilla de aspersión. Como primer punto el conjunto de reguladores de presión encontrados marca Senninger, primeramente, no eran del mismo calibre, pues se encontraron de 10 psi, 15 psi y 20 psi, además con más de 10 años de uso, por lo que ya no funcionaban de forma correcta regulando el flujo de agua hacia la superficie. Así mismo, las boquillas encontradas de marca Senninger de mayor

diámetro al inicio del pivote provocaron mayores descargas de agua en los primeros tramos, según la figura 20.

Segundo punto fue la separación entre aspersores que en promedio estaban a 3 m, sin embargo se encontraron separaciones desde 1 m a 7 m, dando como resultado una variación del 33.95 % medida por el coeficiente de variación (CV), superando el umbral del 30 % expuesto por Brown (1998), indicando que la data puede estar fuera de control y bajo este contexto una distribución de aspersores no uniforme.

Considerando los reguladores de presión utilizados y el número de boquillas encontrados, el pivote se encontró operando bajo un hidromódulo de 800 gpm o su equivalente de $181.80 \text{ m}^3/\text{h}$, determinado por un caudalímetro de tubo (figura 36A). Esto provocó que la tubería lateral de 6 inch de diámetro manejara una velocidad de flujo confinado de 2.70 m/s, cercanos a los 3 m/s, máximos permitidos dentro de una tubería según Sotelo Ávila (1994).

Esto provocó un gasto excesivo de energía tal lo indica González et al. (2002), explicando el porqué de las láminas por debajo de lo necesario en el final del pivote. Así también, el gasto excesivo de energía puede ser observado a través de la disminución de la presión en los diferentes tramos del pivote; en el primer tramo la presión fue de 17 psi, en el segundo tramo de 17 psi y en tercero de 12 psi.

3.5.2 Cartilla de Aspersión rediseñada para el pivote central

Los resultados del rediseño del pivote se presentan a continuación divididos en un resumen general, una estimación de la uniformidad de riego esperada, las láminas de riego a diferentes velocidades de rotación del pivote y la cartilla de aspersión del pivote.

En el cuadro 26, se presenta el resumen general del rediseño del pivote central a la velocidad máxima, es decir al 100 %.

Cuadro 26. Resumen del rediseño del pivote central a velocidad máxima del 100 %.

REDISEÑO DEL PIVOTE CENTRAL	
Caudal de descarga del sistema	45.27 L/s
Longitud total pivote	233.10 m
Área cobertura (360°) por posición	17.07 ha
Distancia a última torre	215.36 m
Velocidad de última torre	4.75 m/min
Tiempo de cobertura a velocidad máxima.	4.70 h
Lámina de riego mínima (100 % de velocidad)	4.40 mm
Presión del aspersor crítico	15 psi
Presión en base del pivote	38 psi

El rediseño de la cartilla de aspersión del pivote seleccionado brindó los siguientes resultados. Para un correcto funcionamiento se determinó que el hidromódulo del pivote oscile en 45.27 L/s, equivalente a 162.90 m³/h y 717 gpm, esto siendo calculado a través de la suma de los caudales individuales de cada boquilla seleccionada, considerando no provocar un sobredimensionamiento que provocaría un gasto excesivo de energía. A su vez se determinó que el pivote aplicará una lámina mínima de 4.40 mm cuando esté operando a un 100 % de su velocidad y será capaz de dar la vuelta de 360 ° sobre sí mismo en 4.70 h de tiempo. Se requiere una presión de 15 psi en el aspersor crítico es decir el más lejano y una presión en la base del pivote de 38 psi.

Si bien la presión requerida en el aspersor crítico es de 15 psi, a través del uso de reguladores de presión se esperarí que todos los aspersores se mantengan con la presión regulada, y esta premisa debe ser cumplida en todos los aspersores que preceden al aspersor crítico, al encontrarse más cercanos y por lo tanto a una presión mayor si no se utilizaran los reguladores previstos. Según Traxco (2019), internacionalmente se admite

una variación máxima en más o en menos el 20 % de la presión del emisor y con esto se produce una variación del 10 % en el caudal aplicado por el pivote.

Así también, se presentan aspectos informativos del pivote como su longitud de 233.10 m, un área de cobertura o bajo riego en una posición de 17.07 ha, considerando la longitud del mismo, una velocidad de desplazamiento lineal de 4.75 m/min en la última torre cuando el pivote opera al 100 % de velocidad.

En el cuadro 27 se muestra la uniformidad de riego esperada en el pivote después del rediseño.

Cuadro 27. Uniformidad de riego esperada en el pivote después del rediseño.

UNIFORMIDAD ESPERADA EN EL PIVOTE	
Coeficiente de uniformidad Herman y Hein	95.97 %
Uniformidad de distribución	93.28 %
Área regada adecuadamente	98.72 %
Área regada excesivamente	0.00 %
Área regada insuficientemente	1.28 %

Según cálculos, con la cartilla de aspersión propuesta el pivote debe de alcanzar bajo condiciones ideales, un coeficiente de uniformidad Hermaan y Hein (CUh) del 95.97 %, una uniformidad de distribución (UD) del 93.28 %, un área regada adecuadamente del 98.72 %, un 0 % de área regada excesivamente y un 1.28 % de área regada insuficientemente. La uniformidad esperada se puede alcanzar a una presión de 38 psi en la base del pivote, de no alcanzarse dicha presión la uniformidad de riego estaría por debajo de lo esperado, como lo mencionan Martin et al. (2017).

El cuadro 28 se muestra las diferentes láminas de riego y tiempos de rotación a diferentes velocidades de desplazamiento del pivote. Para el cálculo el lector puede ubicarse en el paso 13 del inciso 4.2.1 de la metodología.

Cuadro 28. Láminas de riego y tiempos de rotación del pivote central a diferentes velocidades porcentuales después del rediseño.

Círculo de 360 grados		
<u>Velocidad (%)</u>	<u>Rotación</u>	<u>Lámina</u>
100	4.70 h	4.40 mm
95	5.00 h	4.70 mm
90	5.30 h	4.90 mm
85	5.60 h	5.20 mm
80	5.90 h	5.50 mm
75	6.30 h	5.90 mm
70	6.80 h	6.30 mm
65	7.30 h	6.80 mm
60	7.90 h	7.40 mm
55	8.60 h	8.00 mm
50	9.50 h	8.80 mm
45	10.60 h	9.80 mm
40	11.90 h	11.10 mm
35	13.60 h	12.60 mm
30	15.80 h	14.70 mm
25	19.00 h	17.70 mm
20	23.70 h	22.10 mm
15	31.70 h	29.50 mm
10	47.50 h	44.20 mm
5	95.00 h	88.50 mm

Como muestra el cuadro 28, el pivote debe regar una lámina mínima de 4.40 mm cuando la operación sea a su mayor velocidad, es decir al 100 %. Conforme el porcentaje de velocidad disminuye, las láminas van incrementando en una relación inversamente proporcional como lo indica Ramírez (2018), de allí que al encontrarse al 50 % de velocidad, es decir dos veces más lento, la lámina incrementa dos veces pasando de

4.40 mm a 8.80 mm. Considerando esta relación se obtuvo este cuadro de láminas en cada disminución de velocidad de un 5 %. Para calcular los días de una rotación únicamente se deberá dividir la cantidad de horas de la rotación en 24 h que son la cantidad de horas que tiene un día.

En la práctica, el cambio de la velocidad del pivote en el riego de caña de azúcar obedece a requerimientos de agua del cultivo en sus fases fenológicas. En la primera etapa de iniciación, que va desde la siembra a los 30 días, el cultivo requiere una menor lámina, entonces aquí aplica el aumento de la velocidad para aplicar una lámina menor, esto repercutirá en una mayor eficiencia operativa de la cantidad de área regada por cada hora trabajada. Conforme el cultivo se va desarrollando va necesitando de mayor cantidad de agua, por lo que se debe disminuir la velocidad para lograr una mayor lámina, y con esto las horas trabajadas en la máquina aumentarán.

En el cuadro 29 se muestra la distribución de aspersores y boquillas en el pivote según rediseño. En la metodología se detalla paso por paso la construcción de la cartilla de aspersión en inciso 4.2.1, que son los fundamentos de diseño. El catálogo de boquillas utilizado para este rediseño se detalla en el cuadro 41A.

Cuadro 29. Distribución de aspersores, boquillas, reguladores de presión de la cartilla de aspersión en el pivote según rediseño.

CARTA DE ASPERSION DEL EQUIPO								
UBICACIÓN			DATA HIDRAULICA			DESCRIPCION DE BOQUILLA		
Torre	No Salida	Distancia Punto pivote (m)	Caudal Requerido (m3-h)	Caudal Selección (m3-h)	Presion de regulador (psi)	No Boquilla	Lamina Riego (mm)	Ganso
1	6	7	0.266	0.293	15	14	4.9	1
1	12	13	0.336	0.343	15	15	4.5	2
1	15	16.3	0.315	0.343	15	15	4.8	3
1	18	19.6	0.379	0.388	15	16	4.5	4
1	21	22.9	0.414	0.438	15	17	4.7	5
1	24	25.8	0.470	0.485	15	18	4.6	6
1	27	29.1	0.571	0.611	15	20	4.7	7
1	30	32.5	0.637	0.661	15	21	4.6	8
1	33	35.8	0.692	0.733	15	22	4.7	9
1	36	39.1	0.756	0.794	15	23	4.7	10
1	39	42.4	0.871	0.877	15	24	4.5	11
1	42	46.1	0.943	0.947	15	25	4.4	12
1	45	49.4	0.955	0.947	15	25	4.4	13
1	48	52.7	1.178	1.201	15	28	4.5	14
2	1	57	1.263	1.285	15	29	4.5	15
2	4	60.3	1.165	1.201	15	28	4.6	16
2	7	63.6	1.229	1.285	15	29	4.6	17
2	10	66.9	1.293	1.376	15	30	4.7	18
2	13	70.2	1.357	1.376	15	30	4.5	19
2	16	73.5	1.420	1.456	15	31	4.5	20
2	19	76.8	1.484	1.564	15	32	4.7	21
2	22	80.1	1.548	1.564	15	32	4.5	22
2	25	83.4	1.612	1.783	15	33	4.9	23
2	28	86.7	1.546	1.564	15	32	4.5	24
2	31	89.5	1.601	1.783	15	33	4.9	25
2	34	92.8	1.793	1.783	15	33	4.4	26
2	37	96.1	1.857	1.869	15	35	4.5	27
2	40	99.4	1.921	1.964	15	36	4.5	28
2	43	102.7	1.985	2.098	15	37	4.7	29
2	46	106	2.048	2.219	15	38	4.8	30
2	49	109.3	2.112	2.219	15	38	4.6	31

Continuación cuadro 29...

2	52	112.6	2.511	2.607	15	41	4.6	32
3	3	116.9	2.596	2.607	15	41	4.4	33
3	6	120.2	2.323	2.461	15	40	4.7	34
3	9	123.5	2.387	2.461	15	40	4.6	35
3	12	126.8	2.413	2.461	15	40	4.5	36
3	15	130	2.648	2.727	15	42	4.6	37
3	18	133.75	2.957	2.990	15	44	4.5	38
3	21	137.55	2.857	2.990	15	44	4.6	39
3	24	140.85	2.931	2.990	15	44	4.5	40
3	27	144.65	3.219	3.272	15	46	4.5	41
3	30	148.45	3.281	3.272	15	46	4.4	42
3	33	152.2	3.139	3.272	15	46	4.6	43
3	36	155.5	3.051	3.134	15	45	4.5	44
3	39	158.9	3.117	3.134	15	45	4.4	45
3	42	162.2	2.943	2.990	15	44	4.5	46
4	2	165.1	2.804	2.990	15	44	4.7	47
4	4	168	2.853	2.859	15	43	4.4	48
4	6	170.9	2.902	2.990	15	44	4.6	49
4	8	173.8	2.900	2.990	15	44	4.6	50
4	10	176.6	2.948	2.990	15	44	4.5	51
4	12	179.5	3.101	3.134	15	45	4.5	52
4	14	182.5	3.449	2.990	15	44	3.8	53
4	16	185.95	3.153	3.272	15	46	4.6	54
4	18	188.3	2.897	3.272	15	46	5.0	55
4	20	191.2	3.247	3.272	15	46	4.5	56
4	22	194.1	3.296	3.438	15	47	4.6	57
4	24	197	3.345	3.438	15	47	4.5	58
4	26	199.9	3.336	3.438	15	47	4.6	59
4	28	202.7	3.437	3.438	15	47	4.4	60
4	30	205.69	3.547	3.577	15	48	4.5	61
4	32	208.59	3.542	3.577	15	48	4.5	62
4	34	211.49	3.592	3.577	15	48	4.4	63
4	36	214.39	3.199	3.272	15	46	4.5	64
5	2	216.59	2.663	2.727	15	42	4.5	65
5	4	218.59	3.668	3.702	15	49	4.5	66
5	8	222.31	3.716	3.702	15	49	4.4	67
5	10	224.31	2.627	2.727	15	42	4.6	68
5	12	226.31	2.517	2.607	15	41	4.6	69

Continuación cuadro 29...

5	14	228.11	2.539	2.607	15	41	4.5	70
5	16	230.11	2.695	2.727	15	42	4.5	71
5	18	232.11	2.037	2.098	15	37	4.6	72
5	19	233.11	2.050	0.733	15	22	1.6	73

El cuadro 29 muestra la cartilla de aspersion rediseñada del pivote central. Está dividido en tres secciones. La primera es la ubicación del aspersor a lo largo del pivote donde se especifica el número de torre, el número de salida y la distancia desde la base, estas medidas se obtuvieron a través de la distribución de aspersores explicada en el inciso 4.2.1 de fundamentos de diseño.

Como el pivote tiene 4 torres, en la cartilla se especifica en qué número de torre se encuentra cada aspersor. En los diferentes tramos de tubería de las diferentes torres se encuentran salidas del inglés “plug”, que son puntos donde se puede realizar la instalación de aspersores, estos se enumeran en orden ascendente tomando como inicio el número 1. Cada resaltar que no en todas las salidas se instalan aspersores, por lo que en la cartilla de aspersion se especifica en qué salida se ha instalado el aspersor, esto obtenido directamente de la estructura del pivote.

En el caso de esta cartilla para el aspersor no 1, se instaló en la salida 6, es decir en las primeras 5 salidas no se instaló ningún aspersor, y solamente se colocó tapones para evitar la fuga de agua en dichos puntos; esta instalación se realizó hasta en la salida 6 para evitar mojar el generador eléctrico que se encarga de dar energía a las torres para su auto-desplazamiento. A su vez el aspersor número 2, se instaló en la salida 12, con este dato se debe de entender que las salidas 7, 8, 9, 10, 11 no tienen aspersor instalado, únicamente tapones para sellar cualquier salida de agua del sistema. Todo lo anterior se repite hasta llegar al último aspersor número 73.

El distanciamiento entre salidas para instalación de aspersores viene predeterminado por el fabricante, por lo que se pueden encontrar salidas a distancias de 1 m, 1.50 m, 2 m,

2.50 m, 3 m, etc., entre cada una de ellas, siendo muy variable. Por tal razón y partiendo de la distancia entre aspersores para un traslape adecuado, se debe distribuir los aspersores de tal forma que queden a distancias más o menos a la apropiada de 3 m; considerando la distancia entre salidas en la estructura del pivote no es necesario utilizar todas las salidas, ya que debe mantener en la medida de lo posible la distancia de 3 m entre aspersores.

En la segunda sección se describen las características operativas del diseño de boquilla siendo el caudal requerido, calculado de acuerdo al inciso 18 de los fundamentos de diseño, esto para cada aspersor. Primeramente se calculó el caudal requerido en el aspersor y luego se seleccionó la boquilla apropiada de acuerdo a las especificaciones técnicas en catálogo de boquillas de marca Nelson (cuadro 41A), seleccionando la boquilla que el caudal de descarga sea el más cercano al caudal requerido; para esto observar las diferencias entre caudales requeridos y el caudales de las boquillas utilizadas y se seleccionó la boquilla donde la diferencia de caudal tienda a 0.

Además, se coloca el calibre del regulador de presión utilizado en cada aspersor. Para este rediseño se utilizaron reguladores de calibre 15 psi por lo que se esperaría que todos los aspersores se mantengan con la presión regulada, y esta premisa debe ser cumplida en todos los aspersores que preceden al aspersor crítico, por encontrarse más cercanos y a una presión mayor si no se utilizaran los reguladores previstos.

En la tercera y última sección se describe la boquilla a utilizar para alcanzar el caudal requerido; como primer punto se describe el número de boquilla de acuerdo al catálogo de boquilla de marca Nelson (cuadro 41A). Como segundo punto se presenta la lámina de riego esperada por el aspersor, calculado según el inciso 18 de los fundamentos de diseño y, como tercer punto se describe en correlativo el número de aspersor en forma ascendente desde el más cercano a la base del pivote hasta el más lejano, siendo un total de 73 aspersores instalados en el pivote.

3.5.3 Evaluación de la uniformidad de riego final después de la reubicación adecuada de boquillas del pivote central según rediseño de la cartilla de aspersión

Se evaluó la uniformidad final de riego del pivote después de haber acondicionado la nueva cartilla de aspersión al mismo; se tomaron las lecturas de las condiciones de operación que se muestran en el cuadro 30.

Cuadro 30. Condiciones de operación durante la evaluación final de la uniformidad de riego.

Condiciones de evaluación		
Revoluciones por minuto (rpm) del motor		2,300 rpm
Psi punto pivote		25 psi
Presión de operación (psi)	Primer tramo	10 psi
	Segundo tramo	10 psi
	Tramo final	10 psi
Velocidad viento (km/h)		3 km/h
Temperatura (°C)		33 °C
Velocidad de operación	Velocidad porcentual	20 %
	Velocidad lineal	1.16 m/min

Como se observa, la prueba se realizó con el motor operando a 2,300 revoluciones por minuto (rpm) en comparación a la prueba inicial con 1,800 rpm; este cambio se debió a problemas en el motor de abastecimiento. En la base del pivote se alcanzó únicamente 25 psi de presión, menor a los 35 psi de la primera prueba, también por problemas del motor de abastecimiento que no brindó la presión de 38 psi requeridos en la base del pivote.

Se midieron las presiones en el primer, segundo y tercer tramo de la longitud del pivote y se obtuvieron 10 psi en cada uno según lecturas del manómetro; con el uso de reguladores de presión de 15 psi se esperaba una presión de 15 psi, sin embargo la baja

presión en la base del pivote de 25 psi podría explicar la presión por debajo de lo esperado de 15 psi. La velocidad del viento durante la prueba fue de 3 km/h a una temperatura de 33 °C.

La figura 21 muestra la distribución de láminas durante la prueba final de la evaluación de la uniformidad.

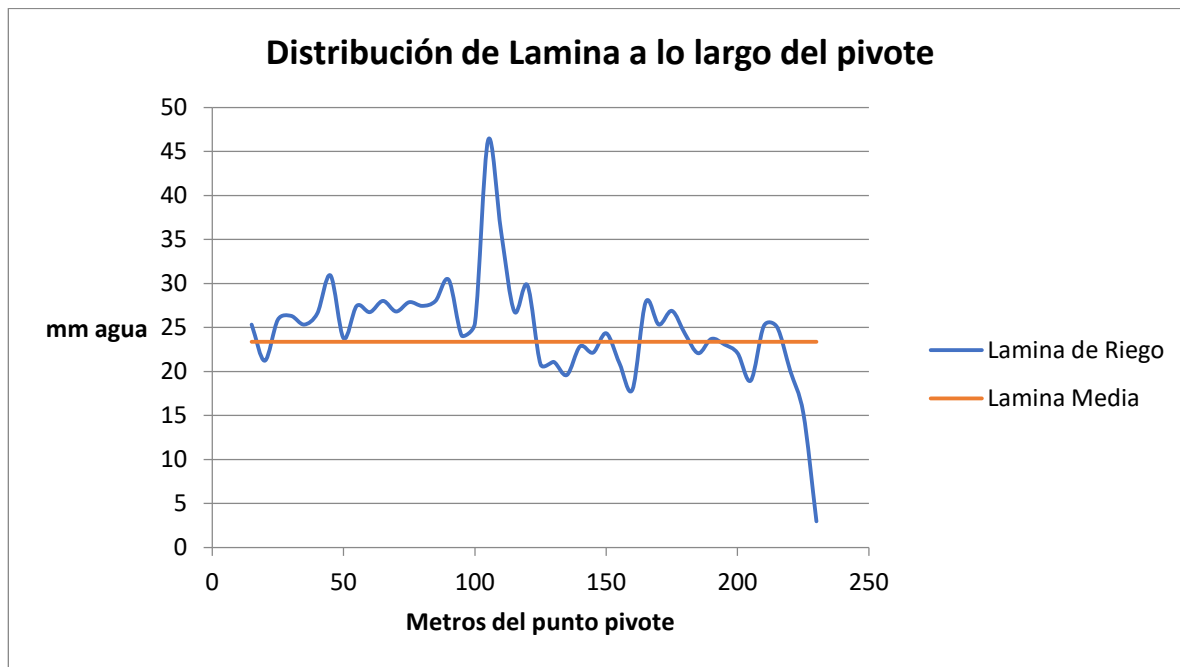


Figura 21. Distribución de láminas en la evaluación final de la uniformidad.

La figura 21, indica la distribución obtenida de láminas recogidas por los diferentes pluviómetros a lo largo de la longitud del pivote. Se observa un comportamiento bastante homogéneo en comparación a la evaluación inicial en los primeros 100 m de conducción; a los 105 m se obtuvo la lámina mayor de 46 mm. Se observa también que después de los 150 m del punto pivote las láminas tendieron a disminuir hasta el final del pivote, en el último punto se obtuvo la menor lámina recolectada de 3 mm; la lámina de 3 mm fue debido a un taponamiento de la boquilla por arena lo que no dejó descargar el caudal necesario.

En el cuadro 31 se describen los resultados obtenidos de la evaluación final de la uniformidad de riego.

Cuadro 31. Resultados de la evaluación final de la uniformidad de riego.

Resultados	
Lamina media (mm)	23.40
Coeficiente de uniformidad Herman y Hein (Cuh)	81.90 %
Uniformidad de distribución (%)	74.20 %
Área regada adecuadamente (%)	63.65 %
Área regada excesivamente (%)	18.33 %
Área regada insuficientemente (%)	18.02 %

La lámina media obtenida fue de 23.40 mm, muy cercano a lo estimado en el diseño del pivote de 22.10 mm, cuando el indicador de velocidad se encuentra en 20 %, siendo este porcentaje al que se realizó la evaluación final. El coeficiente de uniformidad Heerman y Hein (CUh) fue de 81.90 %, clasificado como “regular” según Palacios Mondaca (2017), indicando que lleva esa distinción cuando el CUh está entre 80 % - 85 %. La uniformidad de distribución (UD) fue del 74.20 %, el área regada adecuadamente de 63.65 %, un área regada excesivamente del 18.33 % y un área regada insuficientemente del 18.02 %. Estos resultados son mejorables a partir de una selección adecuada del equipo de abastecimiento, así como asegurando el servicio de mantenimiento mecánico del motor para evitar fallas mecánicas como las experimentadas en esta evaluación final.

A. Comparación entre la uniformidad inicial y final

En figura 22, se realiza una comparación entre las láminas obtenidas en las evaluaciones de uniformidad antes y después del rediseño.

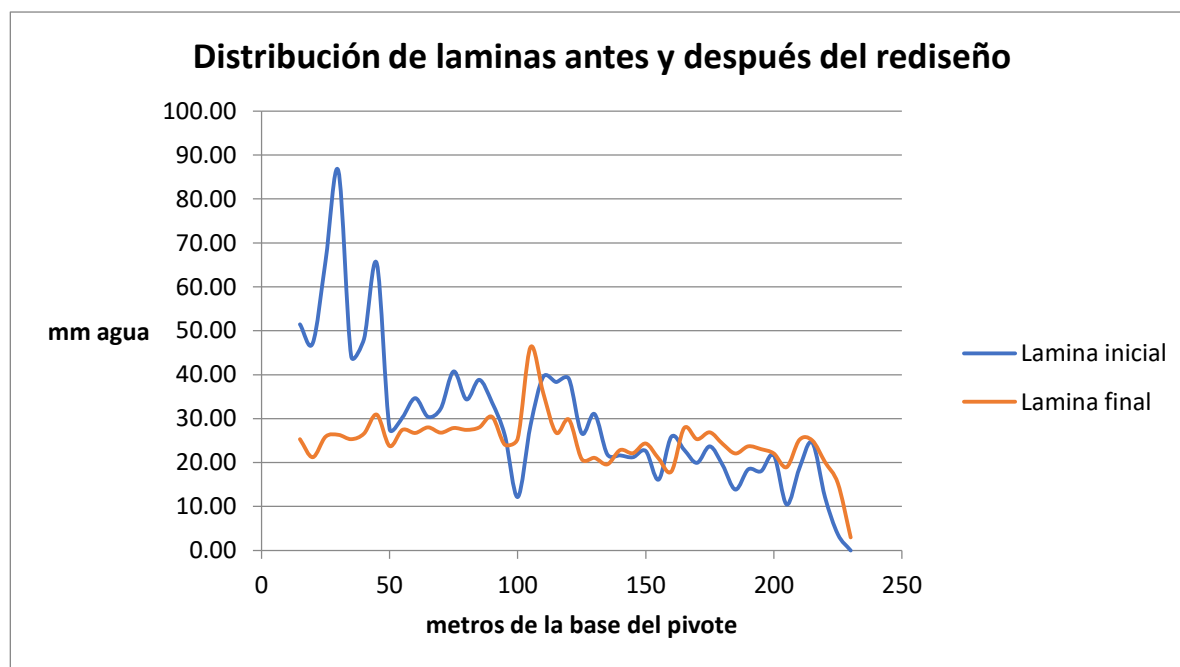


Figura 22. Comparación de distribución de láminas en la evaluación inicial y final de la uniformidad.

Se observa que en los primeros 50 m de conducción están las mayores diferencias entre las láminas iniciales y finales, siendo a la distancia de 30 m en la evaluación inicial donde se obtuvo la lámina mayor de 86 mm, sin embargo, en la evaluación final se obtuvo 26 mm, muy cercana a la media.

En la figura 23, se puede observar una comparación entre los coeficientes de uniformidad (C_{uh}) y la uniformidad de distribución (UD) antes y después del rediseño.

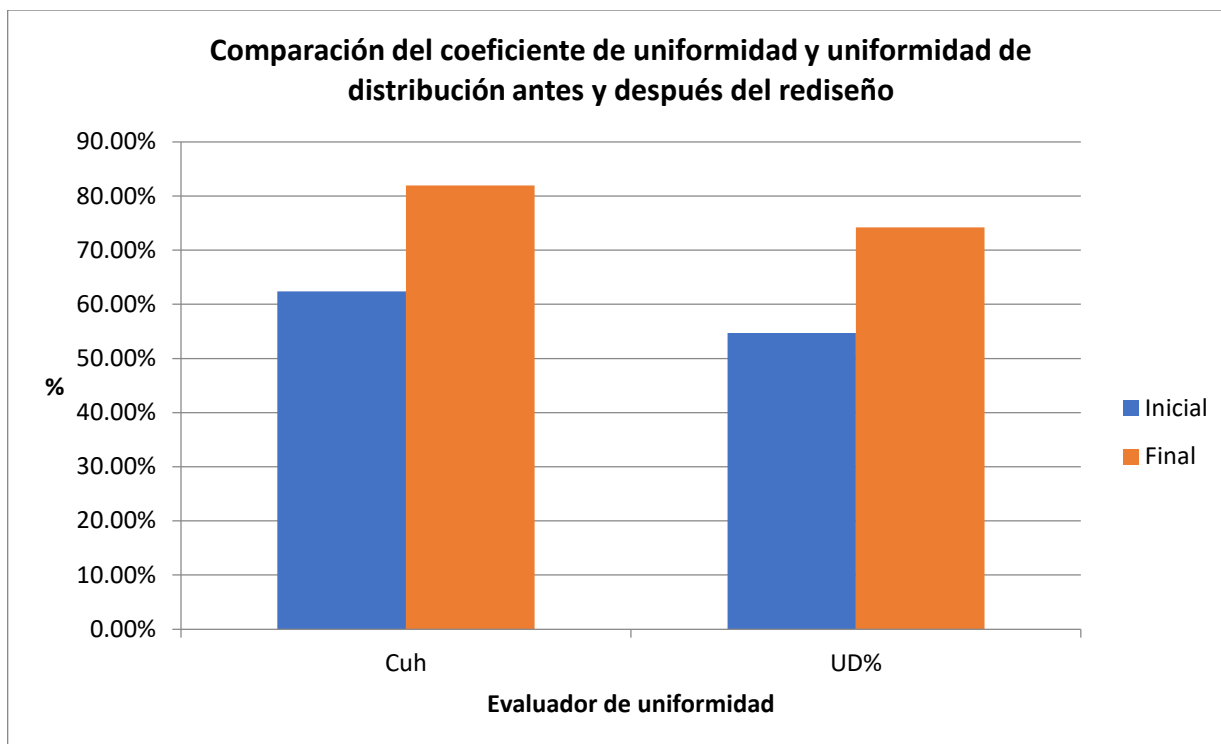


Figura 23. Comparación del coeficiente de uniformidad y la uniformidad de distribución antes y después del rediseño.

Se observa que en ambos casos aumento la calidad de riego según estos evaluadores, hasta un 81.90 % en el Cuh en comparación del 62.40 % inicial y un 74.10 % de UD en comparación del 54.70 % inicial.

La figura 24, compara los porcentajes de áreas regadas en el pivote.

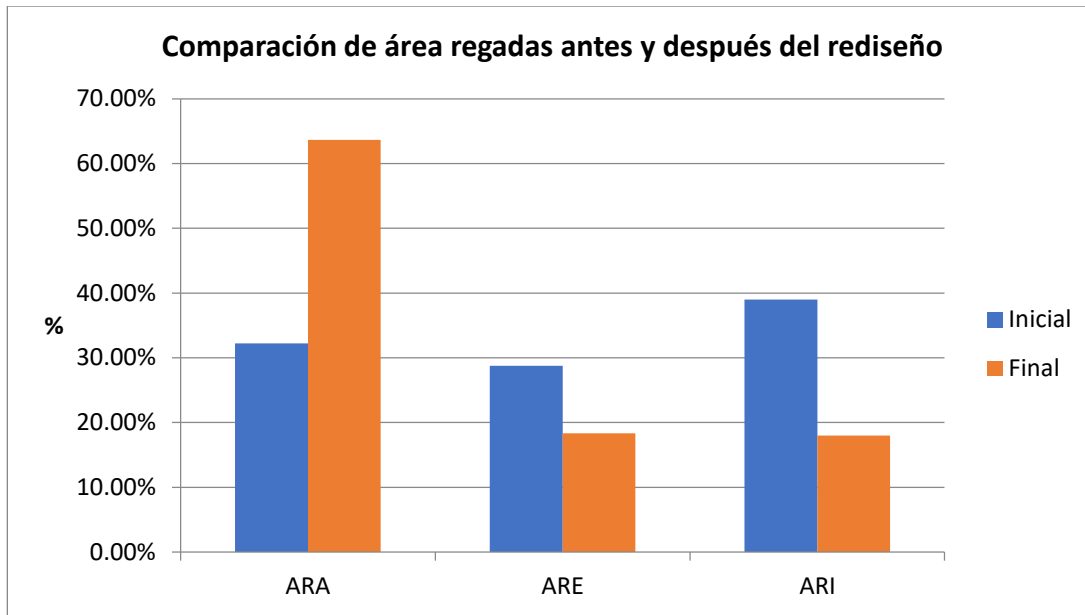


Figura 24. Comparación de las áreas regadas adecuadamente, excesivamente e insuficientemente antes y después del rediseño.

Se puede observar que el área regada adecuadamente (ARA) aumento después del rediseño hasta un 63.65 % en comparación del 32.23 % inicial; el área regada excesivamente (ARE) disminuyó a un 18.33 % en comparación del 28.75 % inicial y el área regada insuficientemente después de ser casi la mitad en la evaluación inicial con un 39.02 % disminuyó a un 18.02 % únicamente.

Los resultados obtenidos en la evaluación final de la uniformidad y la uniformidad teórica esperada según el rediseño no se alcanzaron como se deseaba. Martin et al. (2017), menciona que debe alcanzarse la presión de diseño, que para este caso fue de 38 psi. Sin embargo, las condiciones de operación durante la prueba el pivote únicamente brindó 25 psi, es decir una diferencia menos 13 psi. Esto explica por qué al final de la longitud del pivote se observaron las menores láminas. Es importante señalar que no se alcanzó la presión de diseño debido a problemas específicos del motor John Deere de abastecimiento del pivote.

Considerando las condiciones de operación durante las evaluaciones inicial y final, en la prueba inicial el motor trabajo a 1,800 rpm, sin embargo, durante la prueba final el tacómetro del motor indico 2300 rpm dado que el motor presento fallas eléctricas, por lo que posiblemente estuvo trabajando por debajo de las revoluciones necesarias para ejercer los 38 psi de presión de diseño.

Considerando los evaluadores anteriores de CU, UD, ARA, ARE y ARI, se puede concluir que el rediseño de la cartilla de aspersión es funcional para mejorar la calidad del riego en los pivotes centrales. Por último el mejoramiento de uniformidad es de vital importancia en el riego de caña de azúcar, ya que una baja uniformidad aplica menores láminas en ciertos sectores de la parcela regada conllevando a aplicar un mayor número de riegos para compensar estas deficiencias. Así también una baja uniformidad conlleva a una mayor despoblación y una baja en el rendimiento final del cultivo de caña de azúcar.

3.5.4 Láminas de riego requeridas por el cultivo y su comparación con las aplicadas durante la temporada de riego

El cuadro 32 muestra la duración de la temporada de riego del cultivo de caña para la zafra 2019-20 de la zona de producción cañera en estudio.

Cuadro 32. Duración de la temporada de riego.

Temporada de riego	
Fecha de corte temporada anterior	13/12/2019
Fecha de inicio de lluvias	17/05/2020
Total temporada riego	156 días

La temporada de riego para el cultivo inició el 13 de diciembre del 2019 al momento de corte de la temporada anterior. El inicio de la temporada lluviosa fue el 17 de mayo del 2020, por lo que la duración total de la temporada de riego fue de 156 días.

En la figura 25 se observa la curva de k_c para el cultivo de caña de azúcar en un ciclo regular de cultivo, de acuerdo a los lineamientos brindados por Juárez (2021), en una comunicación personal para el diseño agronómico en el cultivo de caña de azúcar.

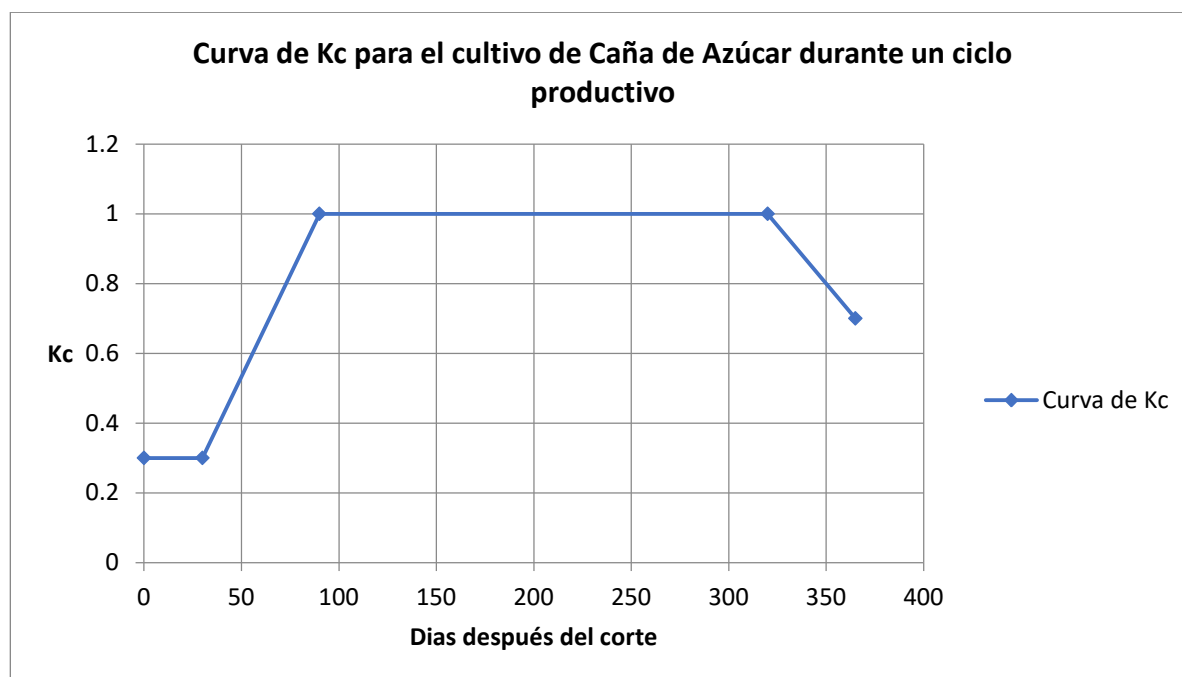


Figura 25. Curva de k_c para el cultivo de caña de azúcar.

Se observa, que para los primeros 0 d a 30 días después del corte (DDC), el k_c del cultivo es constante, siendo de 0.30 (adimensional), sin embargo, de los 30 d a 90 días experimenta un crecimiento proporcional hasta llegar a un k_c de 1, de los 90 días en adelante el cultivo permanece con un k_c constante de uno hasta los 320 días, siendo a partir de aquí que el k_c decrece de forma proporcional hasta llegar a 0.70 a los 365 días.

En la figura 26 se observa la evapotranspiración de referencia (E_{to}) durante la temporada de riego de forma gráfica.

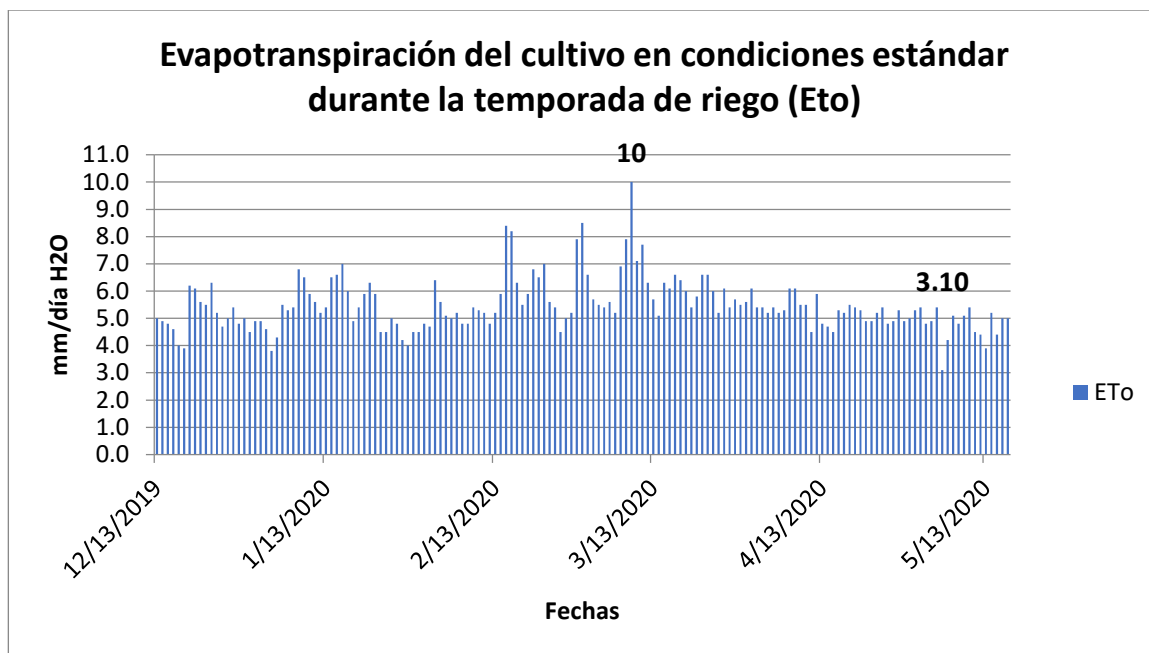


Figura 26. Evapotranspiración de referencia para la zona en estudio en la temporada de riego.

En la figura 26, el eje X representa las fechas de la temporada de riego, siendo la primera el 13 de diciembre de 2019 cuando inició el ciclo del cultivo y la última fecha el 17 de mayo de 2021 cuando las lluvias iniciaron, por lo que la temporada de riego para ese ciclo llegó a su fin. En el eje Y se observan las cantidades evapotranspiradas en cada día, siendo la fecha 9 marzo de 2020 el día más caluroso con 10 mm evapotranspirados (Eto) y el 5 de mayo de 2020 el día más frío con solo 3.10 mm de Eto.

La figura 27 muestra el balance hídrico entre evapotranspiración de referencia y la precipitación en la zona de estudio. A su vez el cuadro 33 muestra el resumen de datos de la figura en mención.

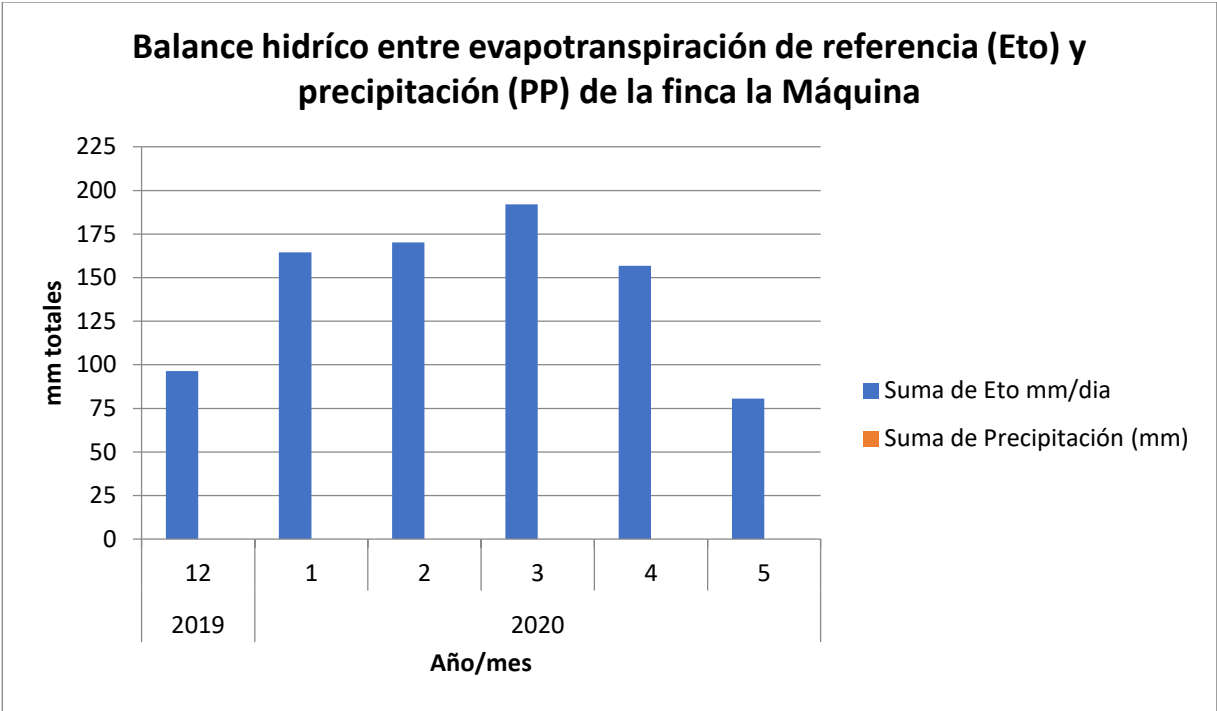


Figura 27. Balance hídrico entre evapotranspiración de referencia (Eto) y la precipitación (PP) en el área de estudio.

Cuadro 33. Resumen del balance hídrico de evapotranspiración de referencia y precipitación.

Año/mes	Suma de Eto mm/día	Suma de precipitación (mm)
2019	96.40	0
Dic	96.40	0
2020	764.10	
Enero	164.50	0
Feb	170.10	0
Marzo	192.10	0
Abril	156.80	0
Mayo	80.60	0
Total general	860.50	0

En el eje X de la figura 27, se muestran los diferentes meses de la temporada de riego de 156 días, comprendidas del 13/12/2019 al 17/05/2020. En el eje Y se presenta las láminas obtenidas de Eto y PP. Se observa, que en ningún mes existió lluvia por lo que la demanda debió ser satisfecha con aplicaciones de riego a la caña de azúcar. La Eto para el mes de diciembre de 2019 fue de 96.40 mm, para enero de 164.50 mm, febrero 170.10 mm, marzo 192.10 mm, abril 156.80 mm y mayo 80.60 mm, todo esto para el año 2020. En total la evapotranspiración por efectos del clima fue de 860.50 mm y para este período no hubo lluvia en ningún día de la temporada.

El cuadro 34, muestra los resultados obtenidos de la evapotranspiración de referencia (Eto), la evapotranspiración del cultivo (Etc), el kc del cultivo según el número de días después de corte (DDC) y la etapa fenológica durante la temporada de riego del 13/12/2019 al 17/05/2020.

Cuadro 34. Resultados de la evapotranspiración de referencia (ETo) y evapotranspiración del cultivo (ETc) para la temporada de riego del 13/12/2019 al 17/05/2020 comprendiendo un total de 156 días.

DDC	Eto mm/día	Etapas fenológica	kc	Etc (mm/día)
0	5	Iniciación	0.30	1.50
1	4.90	Iniciación	0.30	1.50
2	4.80	Iniciación	0.30	1.40
3	4.60	Iniciación	0.30	1.40
4	4.00	Iniciación	0.30	1.20
5	3.90	Iniciación	0.30	1.20
6	6.20	Iniciación	0.30	1.90
7	6.10	Iniciación	0.30	1.80
8	5.60	Iniciación	0.30	1.70
9	5.50	Iniciación	0.30	1.70

DDC	Eto mm/día	Etapas fenológica	kc	Etc (mm/día)
11	5.20	Iniciación	0.30	1.60
12	4.70	Iniciación	0.30	1.40
13	5	Iniciación	0.30	1.50
14	5.40	Iniciación	0.30	1.60
15	4.80	Iniciación	0.30	1.40
16	5.00	Iniciación	0.30	1.50
17	4.50	Iniciación	0.30	1.40
18	4.90	Iniciación	0.30	1.50
19	4.90	Iniciación	0.30	1.50
20	4.60	Iniciación	0.30	1.40

Continuación cuadro 34...

DDC	Eto mm/día	Etapas fenológica	kc	Etc (mm/día)
21	3.80	Iniciación	0.30	1.10
22	4.30	Iniciación	0.30	1.30
23	5.50	Iniciación	0.30	1.70
24	5.30	Iniciación	0.30	1.60
25	5.40	Iniciación	0.30	1.60
26	6.80	Iniciación	0.30	2
27	6.50	Iniciación	0.30	2
28	5.90	Iniciación	0.30	1.80
29	5.60	Iniciación	0.30	1.70
30	5.20	Iniciación	0.30	1.60
31	5.40	Macollamiento	0.31	1.70
32	6.50	Macollamiento	0.32	2.10
33	6.60	Macollamiento	0.34	2.20
34	7	Macollamiento	0.35	2.40
35	6	Macollamiento	0.36	2.20
36	4.90	Macollamiento	0.37	1.80
37	5.40	Macollamiento	0.38	2.10
38	5.90	Macollamiento	0.39	2.30
39	6.30	Macollamiento	0.41	2.60
40	5.90	Macollamiento	0.42	2.50
41	4.50	Macollamiento	0.43	1.90
42	4.50	Macollamiento	0.44	2
43	5	Macollamiento	0.45	2.30
44	4.80	Macollamiento	0.46	2.20
45	4.20	Macollamiento	0.48	2
46	4	Macollamiento	0.49	2
47	4.50	Macollamiento	0.50	2.20
48	4.50	Macollamiento	0.51	2.30
49	4.80	Macollamiento	0.52	2.50
50	4.70	Macollamiento	0.54	2.50
51	6.40	Macollamiento	0.55	3.50
52	5.60	Macollamiento	0.56	3.10
53	5.10	Macollamiento	0.57	2.90

DDC	Eto mm/día	Etapas fenológica	kc	Etc (mm/día)
55	5.20	Macollamiento	0.59	3.10
56	4.80	Macollamiento	0.61	2.90
57	4.80	Macollamiento	0.62	3
58	5.40	Macollamiento	0.63	3.40
59	5.30	Macollamiento	0.64	3.40
60	5.20	Macollamiento	0.65	3.40
61	4.80	Macollamiento	0.66	3.20
62	5.20	Macollamiento	0.68	3.50
63	5.90	Macollamiento	0.69	4.10
64	8.40	Macollamiento	0.70	5.90
65	8.20	Macollamiento	0.71	5.80
66	6.30	Macollamiento	0.72	4.50
67	5.50	Macollamiento	0.73	4.00
68	5.90	Macollamiento	0.75	4.40
69	6.80	Macollamiento	0.76	5.10
70	6.50	Macollamiento	0.77	5
71	7	Macollamiento	0.78	5.50
72	5.60	Macollamiento	0.79	4.40
73	5.40	Macollamiento	0.80	4.30
74	4.50	Macollamiento	0.82	3.70
75	5	Macollamiento	0.83	4.10
76	5.20	Macollamiento	0.84	4.40
77	7.90	Macollamiento	0.85	6.70
78	8.50	Macollamiento	0.86	7.30
79	6.60	Macollamiento	0.87	5.80
80	5.70	Macollamiento	0.89	5.10
81	5.50	Macollamiento	0.90	4.90
82	5.40	Macollamiento	0.91	4.90
83	5.60	Macollamiento	0.92	5.20
84	5.20	Macollamiento	0.93	4.90
85	6.90	Macollamiento	0.94	6.50
86	7.90	Macollamiento	0.96	7.60
87	10	Macollamiento	0.97	9.70

Continuación cuadro 34...

DDC	Eto mm/día	Etapas fenológica	kc	Etc (mm/día)
89	7.70	Macollamiento	0.99	7.6
90	6.30	Macollamiento	1.00	6.3
91	5.70	Elongación	1.00	5.7
92	5.10	Elongación	1.00	5.1
93	6.30	Elongación	1.00	6.3
94	6.10	Elongación	1.00	6.1
95	6.60	Elongación	1.00	6.6
96	6.40	Elongación	1.00	6.4
97	6.00	Elongación	1.00	6.0
98	5.40	Elongación	1.00	5.4
99	5.80	Elongación	1.00	5.8
100	6.60	Elongación	1.00	6.6
101	6.60	Elongación	1.00	6.6
102	6.00	Elongación	1.00	6.0
103	5.20	Elongación	1.00	5.2
104	6.10	Elongación	1.00	6.1
105	5.40	Elongación	1.00	5.4
106	5.70	Elongación	1.00	5.7
107	5.50	Elongación	1.00	5.5
108	5.60	Elongación	1.00	5.6
109	6.10	Elongación	1.00	6.1
110	5.40	Elongación	1.00	5.4
111	5.40	Elongación	1.00	5.4
112	5.20	Elongación	1.00	5.2
113	5.40	Elongación	1.00	5.4
114	5.20	Elongación	1.00	5.2
115	5.30	Elongación	1.00	5.3
116	6.10	Elongación	1.00	6.1
117	6.10	Elongación	1.00	6.1

DDC	Eto mm/día	Etapas fenológica	kc	Etc (mm/día)
118	5.50	Elongación	1.00	5.5
119	5.50	Elongación	1.00	5.5
120	4.50	Elongación	1.00	4.5
121	5.90	Elongación	1.00	5.9
122	4.80	Elongación	1.00	4.8
123	4.70	Elongación	1.00	4.7
124	4.50	Elongación	1.00	4.5
125	5.30	Elongación	1.00	5.3
126	5.20	Elongación	1.00	5.2
127	5.50	Elongación	1.00	5.5
128	5.40	Elongación	1.00	5.4
129	5.30	Elongación	1.00	5.3
130	4.90	Elongación	1.00	4.9
131	4.90	Elongación	1.00	4.9
132	5.20	Elongación	1.00	5.2
133	5.40	Elongación	1.00	5.4
134	4.80	Elongación	1.00	4.8
135	4.90	Elongación	1.00	4.9
136	5.30	Elongación	1.00	5.3
137	4.90	Elongación	1.00	4.9
138	5.00	Elongación	1.00	5.0
139	5.30	Elongación	1.00	5.3
140	5.40	Elongación	1.00	5.4
141	4.80	Elongación	1.00	4.8
142	4.90	Elongación	1.00	4.9
143	5.40	Elongación	1.00	5.4
144	3.10	Elongación	1.00	3.1
145	4.20	Elongación	1.00	4.2
146	5.10	Elongación	1.00	5.1

Continuación cuadro 34...

DDC	Eto mm/día	Etapas fenológicas	kc	Etc (mm/día)
147	4.80	Elongación	1.00	4.8
148	5.10	Elongación	1.00	5.1
149	5.40	Elongación	1.00	5.4
150	4.50	Elongación	1.00	4.5
151	4.40	Elongación	1.00	4.4
152	3.90	Elongación	1.00	3.9
153	5.20	Elongación	1.00	5.2
154	4.40	Elongación	1.00	4.4
155	5.00	Elongación	1.00	5.0
156	5.00	Elongación	1.00	5.0

Según el cuadro 34, el día después de corte (DDC) 87 la evapotranspiración de referencia (Eto) fue de 10 mm/día de agua, siendo este el valor máximo. Así también, se observa que para el DDC 144 la Eto fue la más baja con solo 3.10 mm/día, por lo que durante la temporada de riego existió una variación de 6.90 mm de lámina entre lo mínimo y lo máximo.

Cuadro 35. Análisis de la evapotranspiración de referencia de la zona en estudio.

Eto (mm/día)	
Promedio	5.50
Máximo	10
Mínimo	3.10
Desviación estándar	1.07
Coefficiente de variación (CV)	19.60 %

En el cuadro 35, se observa un resumen de los resultados del cuadro anterior. El promedio de evapotranspiración de referencia (Eto) en la temporada de riego fue de 5.50 mm/día

con valores máximos y mínimos de 10 mm y 1.30 mm/día, respectivamente. Cabe resaltar, que la variación diaria de las cantidades de agua evapotranspirada fue del 1.07 mm diarios, que al compararlo con la media se obtuvo un 19.60 % medido por el coeficiente de variación (CV).

A. Lamina requerida durante la temporada de riego

En la figura 28, se observa la evapotranspiración/día de la caña de azúcar en la temporada de riego, siendo esta equivalente a la lámina de agua neta requerida por el cultivo para su óptimo crecimiento y desarrollo sin restricciones de humedad.

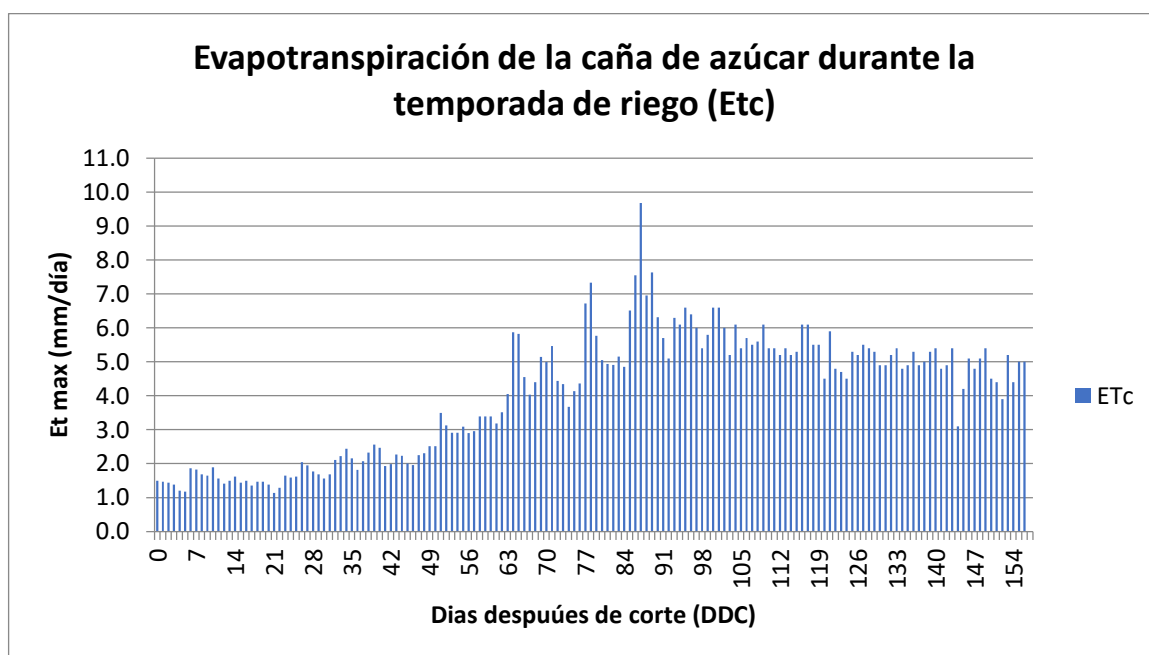


Figura 28. Evapotranspiración de cultivo equivalente a la lámina neta requerida del cultivo de caña de azúcar.

Para el cálculo, se consideró la evapotranspiración de referencia y el kc del cultivo para la etapa de desarrollo correspondiente. En el eje X, se observan los días después de corte del cultivo de caña de azúcar (DDC), y en el eje Y, la Etmax en mm/día; los datos se

pueden observar detenidamente en el cuadro 26. Se observa que la E_{tmax} durante la temporada de riego fue al día 87 DDC con 9.70 mm evapotranspirados ese día.

El cuadro 36, presenta un resumen de la gráfica anterior, es decir la lámina de riego neta requerida por etapa fenológica del cultivo de caña de azúcar.

Cuadro 36. Resumen de las láminas requeridas de riego en los 156 días de temporada de riego.

Etapas fenológicas	Lamina requerida
Iniciación	48 mm
Macollamiento	237 mm
Elongación	350 mm
Total general	634 mm

El cuadro 36 presenta las sumas de las láminas de agua requeridas (mm) en la temporada de riego de 156 días, esto por etapa fenológica.

B. Lámina aplicada durante la temporada de riego

El cuadro 37, muestra la cantidad de agua aplicada en la temporada de riego para el cultivo de caña de azúcar en la localidad de estudio.

Cuadro 37. Láminas aplicadas según etapa fenológica en la temporada de riego.

Etapa fenológica	Número de riegos	Lamina por evento (mm)	Lamina bruta (mm)	Ea	Lamina neta (mm)
Iniciación	2	34	68	80 %	54
Macollamiento	3	40	120		96
Elongación	2	40	80		64
Totales	7				214

Se aplicaron un total de 7 riegos en toda la temporada, que sumando las láminas se aplicó una lámina bruta (lb) de 268 mm; considerando una eficiencia del 80 % del método empleado estimamos una lámina neta (ln) de 214 mm. Para la etapa de iniciación se aplicó una lb de 68 mm y una ln de 54 mm; para macollamiento una lb de 120 mm y una ln de 96 mm; para elongación una lb de 80 mm y 64 mm de ln. Las láminas de riego se aplicaron a velocidades comerciales del 10 % y 15 %, en un tiempo de 31 h por posición y un total de 248 h netas requeridas para regar las 8 posiciones asignadas al pivote móvil, es decir una duración de 10.33 d $\approx$ 11 días, esto en una operación sin tiempos perdidos.

En el cuadro 38 se observa una comparación de las láminas netas requeridas y aplicadas durante la temporada de riego.

Cuadro 38. Láminas aplicadas y requeridas durante la temporada de riego.

Etapa fenológica	Lamina neta requerida (mm)	Lámina neta aplicada (mm)	Diferencia (mm)	Factor K
Iniciación	48	54	+6	1.13
Macollamiento	237	96	-141	0.41
Elongación	350	64	-286	0.18
Totales	635	214	-421	0.34

Se observa, que para la etapa de iniciación existe una aplicación de 6 mm más respecto a lo requerido, con un factor K de 1.13, indicando que se regó un 13 % más de lo necesario. Para la etapa de macollamiento se observa que existió una deficiencia de lámina de 141 mm y un factor K de 0.41, equivaliendo al 41 % de lo requerido. Para la etapa de elongación se observó una deficiencia de 286 mm y un factor K de 0.18, es decir se regó un 18 % de lo requerido. En conjunto para la temporada de riego se dejaron de regar 421 mm de agua con un factor K de 0.34, equivalente a un tercio de la cantidad de agua necesaria para el óptimo crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar en la localidad de estudio.

Las diferencias en las láminas aplicadas respecto a las requeridas se deben a diversos factores. Para el caso de iniciación se aplica una mayor lámina de la requerida por falta de conocimiento del diseño agronómico, aunque fue bastante aceptable. Se tiene la creencia que se debe saturar el suelo incluso a mayor profundidad de las raíces, provocando un exceso de riego y no un aprovechamiento por parte del cultivo.

Para el caso de las etapas de macollamiento y elongación, las diferencias de láminas radicarón en dos factores fundamentalmente. El primer factor, fue una asignación extra de posiciones por ser este un pivote móvil, dando como resultado una mayor área de su capacidad y un alargamiento de las frecuencias de riego, por lo que para cierto período no se satisfacen las láminas requeridas. El segundo factor es un problema generalizado de falta de agua en las fuentes de abastecimiento; cuando un pivote central debe estar operando entre 20 h - 22 h diarias, la falta de agua en las fuentes no permiten una operación mayor a 10 h según registros de la finca, esto hace que no se puedan dar las láminas y frecuencia adecuadas, resultando en láminas menores a las requeridas.

3.6 CONCLUSIONES

1. Se determinó un estado inicial de uniformidad de riego del pivote central, obteniendo un Coeficiente de Uniformidad (CU) del 62.40 %, una Uniformidad de Distribución (UD) del 54.70 %, un Área Regada Adecuadamente (ARA) de 32.23 %, Área Regada Excesivamente (ARE) de 28.75 %, Área Regada Insuficientemente (ARE) de 39.02 %. Considerando lo anterior, se calificó como un riego de baja calidad.
2. A través del rediseño de la cartilla de aspersión del pivote central se mejoró la calidad del riego, alcanzando valores teóricos de 95.90 % de Coeficiente de Uniformidad , 93.30 % de Uniformidad de Distribución , 98.70 % de Área Regada Adecuadamente , 0 % de Área Regada Excesivamente y 1.20 % de Área Regada Insuficientemente .
3. Se evaluó la uniformidad de riego después de la reubicación adecuada de boquillas del pivote central según la cartilla de aspersión y se obtuvieron valores del 81.90 % de Coeficiente de Uniformidad , 74.20 % de Uniformidad de Distribución , 63.65 % de Área Regada Adecuadamente , 18.33 % de Área Regada Excesivamente y 18.02 % de Área Regada Insuficientemente ; en comparación de la evaluación inicial, los resultados muestran una mejora considerable, sin embargo se categorizó como un riego de regular calidad. No fue posible alcanzar la uniformidad teórica esperada, debido a que el motor de abastecimiento por problemas mecánicos no ejerció la presión suficiente para suplir los requerimientos energéticos del rediseño.
4. Se determinó la lámina de riego requerida por el cultivo de caña durante la temporada de riego en 635 mm y la aplicada de 214 mm, dando como resultado un factor K de 0.34, significando que solo se aplicó el 34 % del agua necesaria en todo el ciclo. Esto debido principalmente a una asignación extra de posiciones de riego en el pivote central, así también una escasez de agua generalizada en las fuentes de abastecimiento.

5. Considerando los resultados obtenidos para la calidad de riego según evaluadores de CU, UD, ARA, ARE y ARI, se puede concluir que el rediseño de la cartilla de aspersión haciendo uso de la sistematización de cálculos empleada en el presente documento puede ser funcional en los sistemas de riego por pivote central, siempre que se alcancen las presiones requeridas según cálculos.

3.7 RECOMENDACIONES

1. Realizar evaluaciones de uniformidad actual en otros pivotes de la misma finca para plantear propuestas de rediseños de cartillas de aspersión.
2. Para futuras evaluaciones finales después del rediseño de cartillas contar con equipos en las mejores condiciones posibles que permitan determinar la calidad del rediseño en los pivotes.
3. Considerar los fundamentos de diseño presentada en la metodología para futuros rediseños de cartillas de aspersión.
4. Para minimizar el efecto de falta de agua en las fuentes de abastecimiento considerar proyectos de inversión como pozos mecánicos.
5. Se recomienda mejorar la uniformidad de riego, así como las aplicaciones de las láminas de riego requeridas para alcanzar las producciones óptimas de caña de azúcar en esta finca.

3.8 BIBLIOGRAFÍA

1. Allen, R; Pereira, L; Raes, D; Smith, Martin. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia, FAO. 277 p.
2. Brown, CE. (1998). *Coefficient of Variation in: Applied Multivariate Statistics in Geohydrology and Related Sciences*. Springer, Berlin, Heidelberg. 155-157 p.
3. Bustos, G. (sf). *Altimetría: nivelación geométrica*. San Juan, Argentina, UNSJ. 18 p.
4. Camejo Barreiro, LE; Duarte Naranjo, L, Guerra Hernández, G. (2017). *Diseño agronómico en máquinas de pivote central, rendimientos, ahorro de agua y energía*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. 38(2):3-16.
5. Castro, O. (2018). *Aplicación del balance hídrico en sistemas de riego "Pivote Central Fijo", caso del estrato litoral centro de la zona cañera guatemalteca*. Tesis Ph.D. Lugo, España, USC. 167 p.
6. Castro, O; Monterroso, H. (2015). *Los sistemas de riego pivote en la zona cañera guatemalteca*. Guatemala: Memoria de Presentación de Resultados de Investigación zafra 2014-2015. CENGICAÑA.
7. CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar), Guatemala. (2012). *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. Melgar, M; Meneses, A; Orozco, H; Pérez, O y Espinosa, R. (eds). Guatemala. 512 p.
8. Chu, S. (1980). *Center Pivot Irrigation Design*. Dakota del Sur, USA, Universidad de Dakota del Sur. 61 p.
9. Departamento de Ingeniería Agrícola. (2017). *Análisis comparativo de la uniformidad de riego: zafra 2016-17 (diapositiva)*. Escuintla, Guatemala. Color.
10. Ecured. (2020). *Eficiencia del riego* (en línea). Consultado 12 enero 2021. Disponible en [http:// https://www.ecured.cu/Eficiencia_del_riego](http://https://www.ecured.cu/Eficiencia_del_riego)
11. Fernández, FJ. (2012). *Guía general para el cálculo, instalación y mantenimiento de bombas hidroneumáticas*. Tesis Lic. Guatemala, Guatemala, USAC. 117 p.
12. Gaudi, F; Howes, D; Ton, Donald. (2007). *Center Pivot Design for Efficient Irrigation of Agricultural Forage Crops*. Irrigation Training and Research Center dic. 2007.



13. González, PA; Stincer, JF; Roque, R. (2002). *Algunas consideraciones para el diseño, explotación y adquisición de máquinas de pivote central*. Ciencias Técnicas Agropecuarias. 11(1):44-53.
14. Herrera, ER; Correa, JR. (2005). *Evaluación técnica y económica de un sistema de riego por pivote central*. Agro sur. 33(2):62-73
15. Jiménez Espinosa, ER; Domínguez González, M; Pérez Hernández, R. (2011). *Parámetros de explotación y uniformidad de riego en la máquina de pivote central OTECH-IRRIMEC*. Ingeniería Agrícola. 1(1):7-12.
16. López Silva, M; Carmentes Hernández, D; Mujica Cervantes, A; PanequeRondom, P. (2018). *Software para el diseño hidráulico de los sistemas de riego de pivote central*. Ciencias Técnicas Agropecuarias. 27(4).
17. Martin, D; Kranz, W; Smith, T; Irmak, S; Burr, C; Yoder, Ron. (2017). *Center Pivot Irrigation Handbook*. Nebraska, USA, Universidad de Nebraska-Lincoln. 130 p.
18. Martin, DL; Kranz, W; Thompson, AL; Liang, H. (2012). *Selecting Sprinkler Packages for Center Pivots*. Transactions of the ASABE. 52(2):513-523.
19. Martin, I; Salcedo, R; Font, R. (2011). *Mecánica de fluidos: Flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles*. Alicante, España, Universidad de Alicante. 72 p.
20. Montero Martinez, J; Tarjuelo, MB; Honrubia, L, Ortíz García, J; Valiente Gómez, M, Sánchez Meléndez, C. (2008). *Influencia de la altura del emisor sobre la eficiencia y la uniformidad en el reparto de agua con equipos pivot*. Reunión de Riego (1), 2008, Córdoba, Argentina. 15-17.
21. Moreno Ramírez, G. (2016). *Evaluación hidráulica del riego mecanizado tipo pivote central*. [Tesis Lic. Coahuila, México, UAAAN.] 61 p.
22. Nelson. (2011). *Pivot Point to End Gun: solutions for mechanized irrigation*. Washington, USA. 48 p.
23. Palacios Mondaca, CA, Díaz Valdés, T; Munguía López, JP; Partida Ruvalcaba, L; Velásquez Alcaraz, V; López Valenzuela, BE. (2017). *Relación entre indicadores de desempeño y la calidad del riego utilizando pivote central*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 8(1):37-49.
24. Paz Fong, D. (2010). *Determinación del coeficiente de uniformidad en los sistemas de riego por pivotes en caña de azúcar*. Tesis Lic. Guatemala, Guatemala, USAC. 126 p.



25. Pérez Leira, R; Alfonso G, EJ; Cárdenas López, JF; López Casteñs, G; Alemán García, C. (2003). *Un estudio de evaluación de la aplicación del riego en sistemas por pivote central*. Ingeniería Hidráulica. 18(3):45-53.
26. Pérez Leira, R; Blanco Cruz, JL; Gomez, NP; Pérez Gil, AG. (2010). *Emisores, uniformidad de riego y rendimiento agrícola en pivotes para cultivos varios*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. 31(1):43-50.
27. Pérez Leira, R; Domínguez Gutiérrez, J; Paneque Rondón, P. (2015). *El cambio del módulo de aspersión en pivotes según criterios económicos para Cuba: modelo teórico*. Ciencias Técnicas Agropecuarias. 24(3):22-27.
28. Pérez Leira, R; Martínez González, Y. (2004). *Diseño hidráulico de los pivotes a partir de criterios agronómicos y operacionales del riego*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. 25(1):8-17.
29. Pérez Leira, R; Martínez González, Y. (2004). *Simplificación y adecuación del método de Allen para determinar el caudal de diseño de los pivotes para el riego del cultivo de la papa*. Ingeniería Hidráulica. 19(2):89-100.
30. Pérez Leira, R; Sabatier Corrales, Y. (2015). *El cambio del módulo de aspersión en pivotes según criterios económicos: aplicación a dos cultivos*. Ciencias Técnicas Agropecuarias. 24(4):25-30.
31. RAE (Real Academia Española). (2008). *Definición de la palabra diseño*. Recuperado 21 may 2019. Disponible en <https://dle.rae.es/?id=DuKP0H9>
32. Ramírez, G. (2018). *Sistemas de Riego Mecanizado (diapositiva)*. Escuintla, Guatemala, Grupo Tecún. 13 diapositivas, color.
33. Senninger. (2017). *Carta de Aspersión del Pivote Central 265-0007*. Florida, USA. 20 p.
34. Sotelo Ávila, G. (1994). *Hidráulica General Vol 1*. 15 ed. Distrito Federal, México, Limusa SA. 550 p.
35. Teejet. (2004). *Guía del usuario de boquillas de pulverización*. Illinois, USA. 56 p.
36. Tornos, N; Pujol, P; Gómez, Y; Boicet, Tony, Goite, LC. (2009). *Evaluación de la calidad del riego en máquinas eléctricas de pivote central del modelo o tipo "Ballama"*. Ciencias Técnicas Agropecuarias. 18(1):59-63.
37. Traxco. (s.f). *Cálculo de las boquillas de riego*. Recuperado 22 may 2019. www.traxco.es/calculo-de-cartas-de-aspersion/



38. _____. (2009). *Tipos de pivote: Central Fijo, Central Móvil, Lineal o Avance Frontal*. Recuperado 10 may 2020. Disponible en <https://www.traxco.es/blog/pivotes-de-riego/revolucion-circular>
39. Valín, MI; Cameira, MR; Teodoro, PR; Pereira, LS. (2012). *DEPIVOT: A model for center-pivot design and evaluation*. Computers and Electronics in Agriculture. 87:159-170.
40. Valín, MI; Pereira, LS. (2007). *DEPIVOT: a software tool for improved water use with center-pivot sprinkler systems*. Options Méditerranéennes :Série B, Etudes et Recherches. 1(56):397-405.
41. Vásquez V, A; Vásquez R, I; Vásquez R, C; Cañamero K, M. (2017). *Fundamentos de Ingeniería de Riegos*. 1ed. Lima, Perú, Universidad Agraria La Molina. 442 p.



3.9 ANEXOS

Cuadro 39A. Lámina recogida en los pluviómetros en las evaluaciones inicial y final de uniformidad de riego.

No.	Dist (Si)	Lamina recogida (mm)	
		Inicial	Final
1	15	51	25
2	20	47	21
3	25	66	26
4	30	86	26
5	35	44	25
6	40	48	27
7	45	65	31
8	50	28	24
9	55	30	27
10	60	35	27
11	65	30	28
12	70	32	27
13	75	41	28
14	80	34	27
15	85	39	28
16	90	34	30
17	95	26	24
18	100	12	25
19	105	28	46
20	110	40	36
21	115	38	27
22	120	39	30

No.	Dist (Si)	Lamina recogida (mm)	
		Inicial	Final
23	125	27	21
24	130	31	21
25	135	22	20
26	140	22	23
27	145	21	22
28	150	23	24
29	155	16	21
30	160	26	18
31	165	23	28
32	170	20	25
33	175	24	27
34	180	19	24
35	185	14	22
36	190	18	24
37	195	18	23
38	200	22	22
39	205	10	19
40	210	19	25
41	215	25	25
42	220	12	20
43	225	4	15
44	230	0	3

Fuente: elaboración propia, 2021.

Cuadro 40A. Análisis comparativo de la uniformidad de riego del Ingenio Santa Ana durante la zafra 2016-17.

Región	CAT-COR	Sistema	Prueba 1 %	Prueba 2 %
3	266-0003	PIVOTE		
	266-0005	PIVOTE		
	267-0002	AVANCE		
	266-0002	PIVOTE		
	264-0002	PIVOTE	78.60	
	264-0003	PIVOTE	83.80	
	266-0004	PIVOTE	57.90	
4	266-0001	PIVOTE	55.30	
5	267-0003	AVANCE	83.10	
	267-0004	AVANCE	79.90	
	263-0001	PIVOTE		
	267-0001	AVANCE		
6	3267-0001	AVANCE	76	83
	3267-0002	AVANCE	88.40	
7	266-0009	AVANCE		
	267-0007	AVANCE		
	267-0008	AVANCE	88.80	
	264-0001	PIVOTE		

Fuente: tomado del Departamento de Ingeniería Agrícola (2017).

Como se observa en el análisis comparativo de la uniformidad, en los equipos de pivote central y avance frontal en el Ingenio Santa Ana, las diferentes uniformidades de riego alcanzadas por estos equipos se han catalogado como bajas, debido a que se encuentran por debajo del 80 % mínimo requerido para considerarse aceptable. Estos resultados se han dado principalmente por malas cartillas de aspersión en los diferentes pivotes, esto hace que se tengan que hacer riegos excesivos para compensar las áreas donde no se alcanza la lámina requerida por la baja uniformidad de riego de los pivotes.



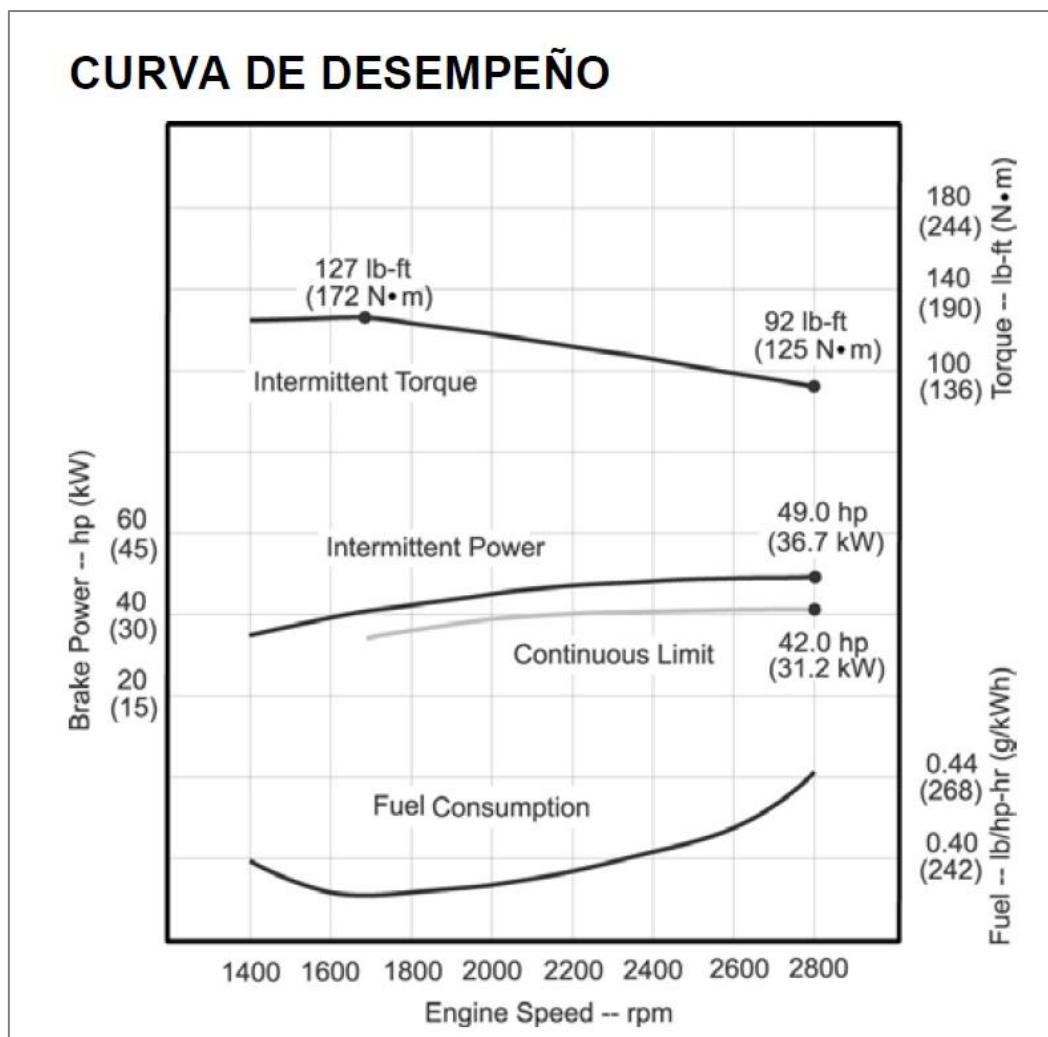
Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 29A. Evaluación de la uniformidad inicial para el pivote.



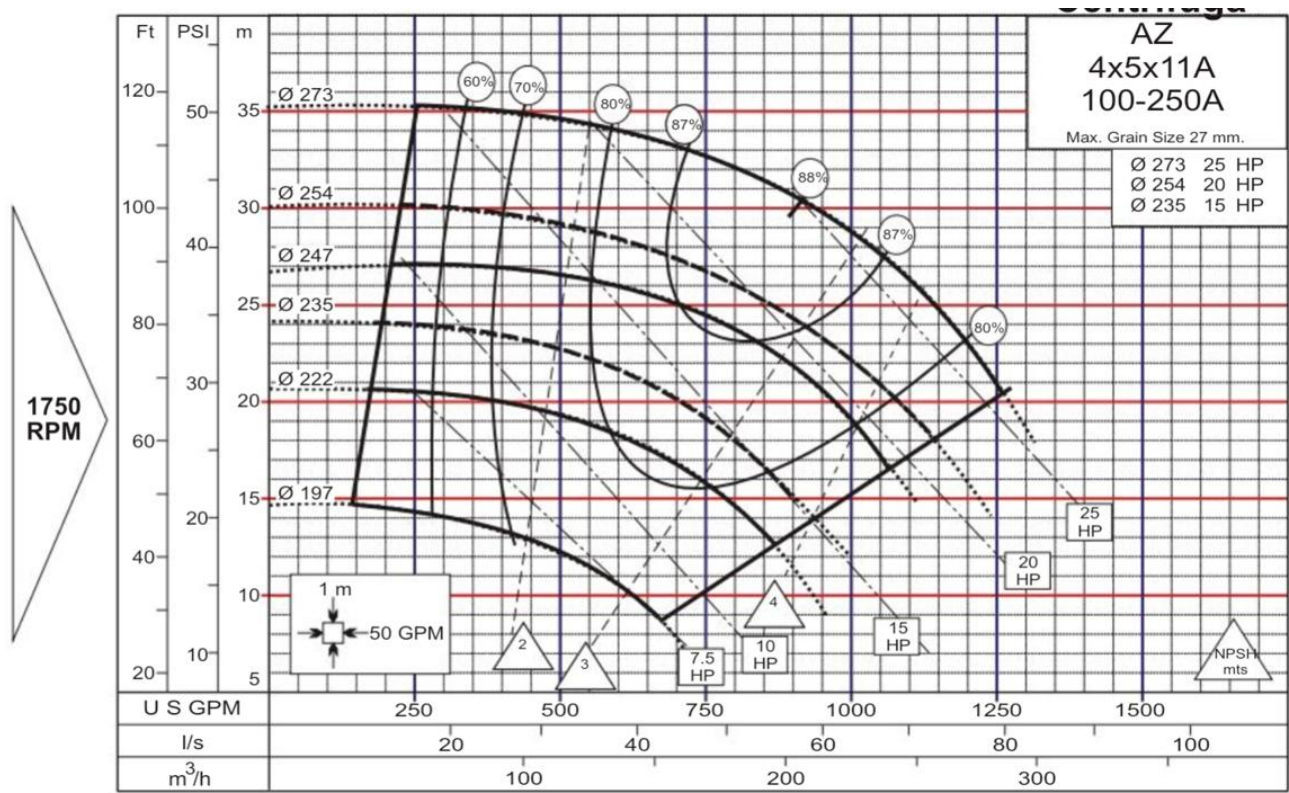
Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 30A. Pivote central de finca La Máquina en estudio, Chiquimulilla, Santa Rosa.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 31A. Curva de desempeño motor John Deere 4024TF270.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 32A. Curva de desempeño bomba Hidromac AZ 4X5X11A.

Cuadro 41A. Catálogo marca Nelson de boquillas para aspersores del pivote.

CATALOGO NELSON								
Caudal de descarga de boquillas (litros por hora)								
No. Boquilla	PRESIÓN UTILIZADA							
	6 psi	10 psi	15 psi	20 psi	25 psi	30 psi	40 psi	50 psi
9	77	100	120	140	157	172	197	220
10	95	122	150	172	193	211	243	272
11	113	148	179	209	232	254	293	329
12	138	179	218	252	281	308	356	400
13	161	209	256	295	331	361	418	467
14	186	241	293	338	379	415	479	536
15	215	279	343	395	443	485	560	626
16	245	317	388	449	502	549	635	710
17	277	359	438	506	568	622	718	799
18	308	397	485	563	629	688	794	887
19	347	447	547	634	709	774	895	1001
20	386	497	611	704	788	863	997	1112
21	418	540	661	763	854	935	1081	1208
22	463	599	733	847	947	1035	1196	1337
23	504	649	794	919	1026	1126	1299	1453
24	554	718	877	1013	1133	1242	1433	1603
25	599	774	947	1094	1222	1340	1546	1728
26	652	840	1028	1187	1328	1456	1680	1880
27	697	900	1103	1274	1424	1560	1839	2014
28	761	981	1201	1387	1551	1699	1962	2194
29	813	1049	1285	1483	1658	1817	2098	2348
30	869	1121	1376	1587	1775	1943	2246	2512
31	922	1190	1456	1680	1880	2059	2197	2659
32	990	1290	1564	1807	2021	2214	2557	2859
33	1056	1363	1783	1928	2155	2359	2725	3047
34	1121	1447	1774	2046	2289	2507	2895	3236
35	1181	1526	1869	2157	2411	2643	3052	3411
36	1204	1603	1964	2266	2534	2777	3206	3586
37	1326	1712	2098	2423	2707	2966	3424	3829
38	1403	1810	2219	2561	2863	3136	3622	4049
39	1481	1912	2341	2705	3023	3311	3824	4272
40	1557	2009	2461	2841	3177	3481	4019	4494
41	1649	2128	2607	3011	3365	3686	4258	4760
42	1726	2228	2727	3149	3522	3858	4453	4980
43	1808	2335	2859	3302	3691	4042	4669	5219
44	1891	2441	2990	3452	3860	4228	4882	5459
45	1982	2560	3134	3618	4045	4431	5117	5720
46	2071	2672	3272	3779	4226	4628	5345	5975
47	2176	2807	3438	3972	4440	4864	5616	6280
48	2261	2920	3577	4130	4796	5059	5841	6531
49	2341	3023	3702	4274	4780	5234	6046	6758
50	2446	3158	3867	4467	4994	5471	6317	7063

Fuente: elaborado con base en Nelson (2011).



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 33A. Preparativos para la instalación de los cambios propuestos en el pivote central.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 34A. Instalación de la nueva cartilla de aspersión al pivote central.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 35A. Evaluación de la uniformidad de riego final en el pivote central.



Fuente: elaboración propia, 2021.

Figura 36A. Caudalímetro de tubo para determinación del hidromódulo del pivote.

Cuadro 42A. Catálogo de diámetros de tubería para pivotes de marca Reinke.

Tipo	Modelo	Diámetro	118' 35.97m	120' 36.58m	137' 41.76m	140' 42.68m	156' 47.55m
Acero Inoxidable	S-2085G	(8 ⁵ / ₈ ") 21.91 cm	●		●	●	●
	S-2065G	(6 ⁵ / ₈ ") 16.83 cm	●		●	●	●
Aluminio	ALUM IV	(6") 15.24 cm	●		●	●	●
	A-80G	(8") 20.32 cm	●		●		●
	A-60G	(6") 15.24 cm	●		●	●	●
Acero Galvanizado	E-2100	(10") 25.40 cm	●	●	●		
	E-2085	(8 ⁵ / ₈ ") 21.91 cm	●		●	●	●
	E-2065	(6 ⁵ / ₈ ") 16.83 cm	●		●	●	●
	E-2060	(6") 15.24 cm	●		●	●	●
	E-2045	(4 ¹ / ₂ ") 4.45 cm	●		●		●
Cromo-Níquel+	E-2665	(6 ⁵ / ₈ ") 16.83 cm	●		●		●
	E-2660	(6") 15.24 cm	●		●		●
Recubierto de Polietileno	S-65PL	(6 ⁵ / ₈ ") 16.83 cm	●		●		●

Fuente: tomado de Reinke (2021).

Guía del uso de la hoja electrónica RECAASPICE, para el rediseño de cartillas de aspersión en pivote central

Paso 1: en la primera ventana se verá el inicio de RECAASPICE, únicamente tendrá que iniciar en “comenzar” para iniciar con el rediseño.



Fuente: tomado de RECAASPICE (2020).

Figura 37A. Inicio de RECAASPICE.

Paso 2: RECAASPICE, se ha dividido en diferentes hojas para facilitar el manejo del mismo. Se inicia con el diseño agronómico del cultivo, esto servirá como base para el cálculo del hidromódulo necesario para la operación del pivote. En las diferentes ventanas tendrá que ir dando “click” en siguiente para seguir avanzando.

PARCELA

Area bajo riego (ha)

82.82

SUELO

Tipo de suelo (textura)

Franco arcilloso

CC (Capacidad de Campo) (%)

35.1

Tipo de Suelo

Pmp (punto de marchitez) (%)

21.4

Es la proporción de arena, limo y arcilla del suelo, importante para el análisis de láminas aplicadas.

Dap (densidad aparente) (g/cm3)

1.2

Ib (Infiltración básica) (mm/h)

2

Pr (profundidad efectiva del suelo (cm)

6

CULTIVO

Kc (coeficiente de desarrollo)

0.9

Zr (prof.de.raices) (cm)

45

Dpm (deficit permitido) (%)

60.00%

SISTEMA DE RIEGO

Metodo de Riego (pivote, frontal)

PIVOTE

Ef (eficiencia de operación) (%)

95.00%

Emisor (marca)

Nelson

Presión de operación (psi)

15

JR (jornada de riego diaria) (h)

20

CLIMA

Eto (evapotranspiración de referencia) (mm/día)

6.5

Viento (km/h)

5

HR (humedad relativa) (%)

60.00%

FUENTE DE AGUA

Derivación (rio, lago, pozo, etc)

RIO

Caudal (m3/h)

454

SIGUIENTE

Dar click en siguiente

En cada ventana, tendrá que llenar la información que se le solicita, todas estarán remarcadas en color amarillo

RESULTADOS DISEÑO AGRONOMICO

Area total (ha)

82.8

Etmax (Evapotranspiración máxima) (mm/día)

5.9

Ln (lamina de riego diaria neta) (mm)

5.9

LAA (lamina de agua aprovechable) (mm)

60.7

LARA (Lamina de agua rapidamente aprovechable) (mm)

36.4

Fr (Frecuencia de Riego) (días)

6.2

Fr aj. (Frecuencia de Riego ajustada) (días)

6.0

Lr aj. (lámina de riego ajustada) (mm)

35.1

Lb (lamina bruta de riego) (mm)

36.9

Lbd (lamina bruta de riego diaria) (mm/día)

6.2

JR (jornada de riego)(h/día)

20.0

Qr (caudal requerido proyecto) (m3/h)

255.0

Qr (caudal requerido proyecto) (gpm)

1122.0

SIGUIENTE

Dar click en siguiente

El caudal a sido determinado existosamente

Siempre que no tenga que ingresar información la pantalla estará remarcada en otro color diferente al amarillo, en este caso es azul

Fuente: tomado de RECAASPICE (2020).
Figura 38A. Resultados del diseño agronómico en RECAASPICE.

Paso 3: según el requerimiento del diseño agronómico, usted deberá seleccionar el hidromódulo que más se adecue al diametro de tuberia del pivote. Procurando que la velocidad de flujo interno no supere los 2.50 m/s para ahorrar en las pérdidas por fricción.

RESUMEN DEL DISEÑO AGRONÓMICO

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA SIGUIENTE

Datos Agronómicos	
Area (ha)	82.8
Textura	Franco arcilloso
Lamina bruta (mm)	36.9
Frecuencia de Riego (días)	6.0
Kc de diseño (coef)	0.9
Caudal requerido (hidromódulo) (GPM)	1122
Caudal requerido (hidromódulo) (m3/h)	255

Datos del Sistema	
Eficiencia Operación	95.00%
Aspersor usado	Nelson
Jornada de Riego	20

DISEÑO DEL HIDROMÓDULO DE TRABAJO DEL PIVOTE CENTRAL

Resumen Diseño Agronómico		
Area (ha)		82.8
Textura		Franco arcilloso
Lamina bruta (mm)		36.9
Lamina bruta diaria (mm)		6.2
Frecuencia de Riego (días)		6.0
Kc de diseño (coef)		0.9
Caudal requerido (hidromódulo)	GPM	1122.0
	m3/h	255.0
	m3/s	0.07

SIGUIENTE

Hidromódulo de Trabajo según características ideales			
Hidromódulo requerido (gpm)	1122.0	Vel flujo interno (m/s)	1.25
T lateral recomendada (pulg)	10.6		

Hidromódulo de trabajo según Criterio del Diseñador			
Hidromódulo seleccionado (gpm)	700	Vel flujo interno (m/s)	2.42
T lateral seleccionada (pulg)	6		

Dar click en siguiente

Fuente: tomado de RECAASPICE (2020).

Figura 39A. Cálculo del hidromódulo de trabajo en RECAASPICE.

Paso 4: ahora se tendrá que determinar la lámina de riego aplicada en el pivote y el tiempo de rotación según la velocidad de operación. Para esto se requiere la información de velocidad de desplazamiento en la última torre y la longitud del pivote.

DETERMINACIÓN DE LA LAMINA DE RIEGO SEGÚN VELOCIDAD DE OPERACIÓN DEL PIVOTE CENTRAL

Favor de llenar los datos del cuadro

Información básica

Longitud hasta la última torre (m)	215.36
Longitud del voladizo (m)	17.74
Velocidad de desplazamiento al 100% (m/min)	4.75
Hidromódulo seleccionado (gpm)	700

Vel.sistema

TIEMPO (100% vel)

Perímetro (m)	1353.15
Rotación (h)	4.7

LÁMINA (100% vel)

Caudal (m3/h)	153.09
Área pivote (m2)	170700.4
Tiempo (h)	4.7
Lámina (mm)	4.4

SIGUIENTE

Determinación de la lámina de riego del pivote cuando el pivote opera al 100% de velocidad

VUELTA DE 360 GRADOS		
% Vel	Rotación (h)	Lámina de Riego
100	4.7	4.4
95	5.0	4.7
90	5.3	4.9
85	5.6	5.2
80	5.9	5.5
75	6.3	5.9
70	6.8	6.3
65	7.3	6.8
60	7.9	7.4
55	8.6	8.0
50	9.5	8.8
45	10.6	9.8
40	11.9	11.1
35	13.6	12.6
30	15.8	14.7
25	19.0	17.7
20	23.7	22.1
15	31.7	29.5
10	47.5	44.2
5	95.0	88.5

Fuente: tomado de RECAASPICE (2020).

Figura 40A. Cálculo de la lámina aplicada considerando el área y el hidromódulo del pivote en RECAASPICE.

Paso 5: esta es la ventana donde se requiere la mayor información. La columna torre hace referencia al número de torre del pivote comenzando desde su base; el número de salida hace referencia a las diferentes salidas que tiene el pivote para poder colocar un cuello de ganso donde irá instalado el aspersor; la posición del ganso es donde se quiere instalarlo; el diámetro de tubería debe medirse a lo largo de la tubería lateral del pivote. Además tendrá dos opciones: darle siguiente o realizar un análisis de equidistancia de la posición de los gansos. Es importante que analice la equidistancia para que su distribución sea lo más uniforme posible y así garantizar un rediseño adecuado.



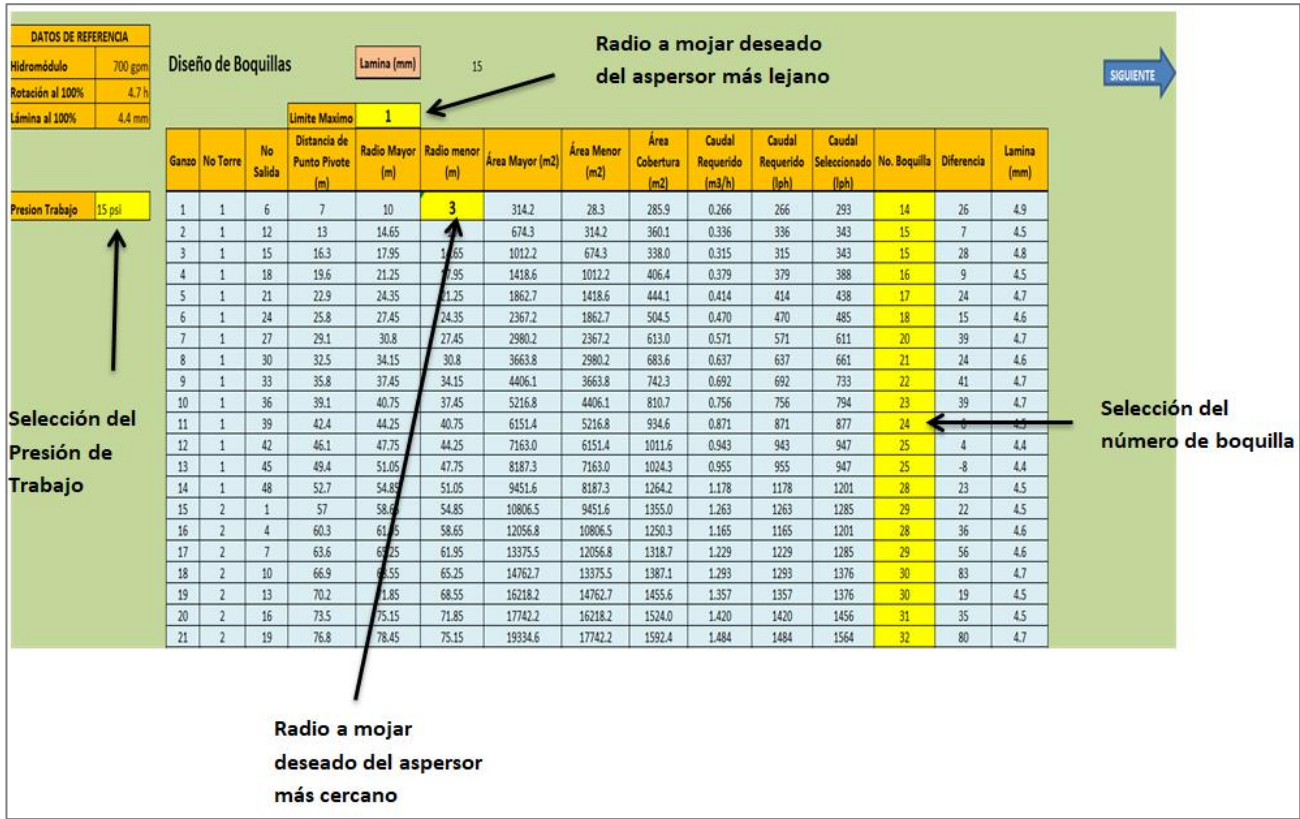
Fuente: tomado de RECAASPICE (2020).

Figura 41A. Espaciamiento de aspersores en la tubería lateral del pivote central en RECAASPICE.

Paso 6: en este paso se encargará de la selección de boquillas para la carta de aspersión. Necesitará considerar los siguientes aspectos:

1. Presión de trabajo: es la presión que utilizará como referencia del diseño, la deseada para el funcionamiento de las boquillas. Usted tendrá diferentes opciones de selección considerando el catálogo comercial.
2. Número de boquilla: aquí deberá seleccionar la boquilla que más se adecue al caudal requerido en el punto específico a lo largo del pivote. Para facilitar el

proceso, se ha creado una columna con el nombre “Diferencia”, esta debe ser lo más cercano a 0.



Fuente: tomado de RECAASPICE (2020).

Figura 42A. Cálculo del caudal requerido y selección de la boquilla idónea en cada punto del pivote en RECAASPICE.

Paso 7: en este paso, se visualizará los resultados de la evaluación de la uniformidad esperada de su carta de aspersión. Se mostrarán los resultados de lámina media (mm), coeficiente de uniformidad de Hermann y Hein, uniformidad de distribución, lámina regada adecuadamente, lámina regada excesivamente y lámina regada insuficientemente.

Evaluación de la Uniformidad									
Distribucion		Coeficiente Uniformidad Herman y Hein			Uniformidad de Distribucion (UD)			Area Regada	
GANZO	DIST (m) = Si	Lamina (mm) =Vi	Vi*Si	Vi-V *Si	Laminas UD (25%)	Si (UD)	Vi*Si (UD)	Cobertura (m2)	Calidad de Riego
1	7	4.9	34.0	2.8	1.58	233.1	369.0	285.9	ARA
2	13	4.5	58.7	0.7	3.84	182.5	700.2	360.1	ARA
3	16.3	4.8	78.5	5.7	4.39	49.4	216.8	338.0	ARA
4	19.6	4.5	88.9	1.5	4.40	92.8	408.2	406.4	ARA
5	22.9	4.7	107.2	5.1	4.41	211.5	931.9	444.1	ARA
6	25.8	4.6	117.9	2.8	4.41	222.3	980.0	504.5	ARA
7	29.1	4.7	137.7	7.9	4.41	148.5	655.1	613.0	ARA
8	32.5	4.6	149.1	4.2	4.43	202.7	897.2	683.6	ARA
9	35.8	4.7	167.9	8.2	4.43	168.0	745.0	742.3	ARA
10	39.1	4.7	181.9	7.5	4.44	46.1	204.9	810.7	ARA
11	42.4	4.5	188.8	0.3	4.44	116.9	519.5	934.6	ARA
12	46.1	4.4	204.9	0.8	4.45	158.9	707.0	1011.6	ARA
13	49.4	4.4	216.8	3.5	4.45	42.4	188.8	1024.3	ARA
14	52.7	4.5	237.7	2.7	4.45	96.1	428.0	1264.2	ARA
15	57	4.5	256.7	2.4	4.46	191.2	852.7	1355.0	ARA
16	60.3	4.6	275.1	6.1	4.46	205.7	917.8	1250.3	ARA
17	63.6	4.6	294.3	10.6	4.47	218.6	976.2	1318.7	ARA
18	66.9	4.7	315.0	16.6	4.47	208.6	931.9	1387.1	ARA
19	70.2	4.5	315.0	1.9				1455.6	ARA
20	73.5	4.5	333.3	5.5				1524.0	ARA
21	76.8	4.7	358.2	15.6				1592.4	ARA

RESULTADOS	
Lamina media (mm)	4.46
Uniformidad Herman y Hein (%)	95.97%
Uniformidad de Distribucion (UD)	93.28%
Area regada adecuadamente (ARA)	98.72%
Area regada excesivamente (ARE)	0.00%
Area regada insuficientemente (ARI)	1.28%

RAN
0.85 (AMR) ≤ ARA ≤ 1
1.15 (AMR) < ARE
0.85 (AMR) ≥ ARI
quedando:
ARE +

Fuente: tomado de RECAASPICE (2020).

Figura 43A. Evaluación de la uniformidad esperada en RECAASPICE.

Paso 8: en esta paso se encargará de calcular la presión necesaria en la base del pivote para su óptima operación, deberá rellenar los espacios en amarillo. A continuación dar click en siguiente.

Diseño Hidráulico													PRESION	15 psi
DIRECTO					INVERSO								MATERIAL	ALUMINIO
TRAMO	LONG	Distancia bajante (m)	CAUDAL lph	Diametro tubería (Pulg)	TRAMO INVERSO	Distancia bajante2 (m)	CAUDAL lph inverso	CAUDAL total lph	CAUDAL total lps	DIAM mm	FRICCIÓN psi	PRESION psi	VELOCIDAD (m/s)	COEF C de fricción
1	7	7.0	293	6	73	1.0	733	733	0.20	101.6	0.00	15.0	0.03	130
2	13	6.0	343	6	72	2.0	2098	2831	0.79	101.6	0.00	15.0	0.10	130
3	16.3	3.3	343	6	71	2.0	2727	5558	1.54	101.6	0.00	15.0	0.19	130
4	19.6	3.3	388	6	70	1.8	2607	8165	2.27	152.4	0.00	15.0	0.12	130
5	22.9	3.3	438	6	69	2.0	2607	10772	2.99	152.4	0.00	15.0	0.16	130
6	25.8	2.9	485	6	68	2.0	2727	13499	3.75	152.4	0.00	15.0	0.21	130
7	29.1	3.3	611	6	67	3.7	3702	17201	4.78	152.4	0.00	15.0	0.26	130
8	32.5	3.4	661	6	66	2.0	3702	20903	5.81	152.4	0.00	15.0	0.32	130
9	35.8	3.3	733	6	65	2.2	2727	23630	6.56	152.4	0.00	15.0	0.36	130
10	39.1	3.3	794	6	64	2.9	3272	26903	7.47	152.4	0.01	15.0	0.41	130
11	42.4	3.3	877	6	63	2.9	3577	30479	8.47	152.4	0.01	15.0	0.46	130
12	46.1	3.7	947	6	62	2.9	3577	34056	9.46	152.4	0.01	15.0	0.52	130
13	49.4	3.3	947	6	61	3.0	3577	37633	10.45	152.4	0.01	15.0	0.57	130
14	52.7	3.3	1201	6	60	2.8	3438	41071	11.41	152.4	0.01	15.1	0.63	130
15	57	4.3	1285	6	59	2.9	3438	44509	12.36	152.4	0.01	15.1	0.68	130
16	60.3	3.3	1201	6	58	2.9	3438	47947	13.32	152.4	0.02	15.1	0.73	130
17	63.6	3.3	1285	6	57	2.9	3438	51385	14.27	152.4	0.02	15.1	0.78	130
18	66.9	3.3	1376	6	56	2.9	3272	54657	15.18	152.4	0.02	15.1	0.83	130
19	70.2	3.3	1376	6	55	2.3	3272	57929	16.09	152.4	0.02	15.2	0.88	130
20	73.5	3.3	1456	6	54	3.4	3272	61202	17.00	152.4	0.03	15.2	0.93	130

Fuente: Tomado de RECAASPICE (2020).

Figura 44A. Determinación de las presiones de trabajo en RECAASPICE.

Paso 9: en este último paso, se resumirán los resultados de su rediseño listos para su impresión. Únicamente tendrá que seleccionar el área que desea imprimir en Excel®.

RECAASPICE® Rediseño de Cartas de Aspersión para Pivote Central Guatemala, Guatemala Fecha: 9/07/2020																																																																	
Proveedor:	Cliente																																																																
JOSE ASDRUBAL TUCH MENDEZ																																																																	
Precipitación <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> Caudal de descarga del sistema 45.27 lps Longitud total pivote 233.10 m Area Cobertura (360°) 17.07 ha Distancia a última torre 215.36 m Vel de última torre 3.11 m Tiempo de Cobertura 4.7 h Presion de Operación 15 psi Presión en base del pivote 38 psi </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> Uniformidad Esperada <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"> Coeficiente de Uniformidad Herman y Hein 95.97% Uniformidad de Distribución 93.28% Área regada adecuadamente 98.72% Área regada excesivamente 0.00% Área regada insuficientemente 1.28% </td> <td style="width: 50%;"> Precaución** Este carta es una estimación del desempeño de tu sistema de riego. Inflación de llantas, deslizamientos, condiciones de suelo, fluctuaciones de caudal y otras condiciones pueden causar desviaciones en la aplicación y tiempo. La info mencionada debería ser usada como una guía y con precaución </td> </tr> </table> </td> </tr> </table>			Caudal de descarga del sistema 45.27 lps Longitud total pivote 233.10 m Area Cobertura (360°) 17.07 ha Distancia a última torre 215.36 m Vel de última torre 3.11 m Tiempo de Cobertura 4.7 h Presion de Operación 15 psi Presión en base del pivote 38 psi	Uniformidad Esperada <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"> Coeficiente de Uniformidad Herman y Hein 95.97% Uniformidad de Distribución 93.28% Área regada adecuadamente 98.72% Área regada excesivamente 0.00% Área regada insuficientemente 1.28% </td> <td style="width: 50%;"> Precaución** Este carta es una estimación del desempeño de tu sistema de riego. Inflación de llantas, deslizamientos, condiciones de suelo, fluctuaciones de caudal y otras condiciones pueden causar desviaciones en la aplicación y tiempo. La info mencionada debería ser usada como una guía y con precaución </td> </tr> </table>	Coeficiente de Uniformidad Herman y Hein 95.97% Uniformidad de Distribución 93.28% Área regada adecuadamente 98.72% Área regada excesivamente 0.00% Área regada insuficientemente 1.28%	Precaución** Este carta es una estimación del desempeño de tu sistema de riego. Inflación de llantas, deslizamientos, condiciones de suelo, fluctuaciones de caudal y otras condiciones pueden causar desviaciones en la aplicación y tiempo. La info mencionada debería ser usada como una guía y con precaución																																																											
Caudal de descarga del sistema 45.27 lps Longitud total pivote 233.10 m Area Cobertura (360°) 17.07 ha Distancia a última torre 215.36 m Vel de última torre 3.11 m Tiempo de Cobertura 4.7 h Presion de Operación 15 psi Presión en base del pivote 38 psi	Uniformidad Esperada <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"> Coeficiente de Uniformidad Herman y Hein 95.97% Uniformidad de Distribución 93.28% Área regada adecuadamente 98.72% Área regada excesivamente 0.00% Área regada insuficientemente 1.28% </td> <td style="width: 50%;"> Precaución** Este carta es una estimación del desempeño de tu sistema de riego. Inflación de llantas, deslizamientos, condiciones de suelo, fluctuaciones de caudal y otras condiciones pueden causar desviaciones en la aplicación y tiempo. La info mencionada debería ser usada como una guía y con precaución </td> </tr> </table>	Coeficiente de Uniformidad Herman y Hein 95.97% Uniformidad de Distribución 93.28% Área regada adecuadamente 98.72% Área regada excesivamente 0.00% Área regada insuficientemente 1.28%	Precaución** Este carta es una estimación del desempeño de tu sistema de riego. Inflación de llantas, deslizamientos, condiciones de suelo, fluctuaciones de caudal y otras condiciones pueden causar desviaciones en la aplicación y tiempo. La info mencionada debería ser usada como una guía y con precaución																																																														
Coeficiente de Uniformidad Herman y Hein 95.97% Uniformidad de Distribución 93.28% Área regada adecuadamente 98.72% Área regada excesivamente 0.00% Área regada insuficientemente 1.28%	Precaución** Este carta es una estimación del desempeño de tu sistema de riego. Inflación de llantas, deslizamientos, condiciones de suelo, fluctuaciones de caudal y otras condiciones pueden causar desviaciones en la aplicación y tiempo. La info mencionada debería ser usada como una guía y con precaución																																																																
Círculo de 360 Grados <table style="width: 100%;"> <tr> <th style="width: 33%;">Vel (%)</th> <th style="width: 33%;">Rotación</th> <th style="width: 33%;">Lamina</th> </tr> <tr><td>100</td><td>4.7 h</td><td>4.4 mm</td></tr> <tr><td>95</td><td>5.0 h</td><td>4.7 mm</td></tr> <tr><td>90</td><td>5.3 h</td><td>4.9 mm</td></tr> <tr><td>85</td><td>5.6 h</td><td>5.2 mm</td></tr> <tr><td>80</td><td>5.9 h</td><td>5.5 mm</td></tr> <tr><td>75</td><td>6.3 h</td><td>5.9 mm</td></tr> <tr><td>70</td><td>6.8 h</td><td>6.3 mm</td></tr> <tr><td>65</td><td>7.3 h</td><td>6.8 mm</td></tr> <tr><td>60</td><td>7.9 h</td><td>7.4 mm</td></tr> <tr><td>55</td><td>8.6 h</td><td>8.0 mm</td></tr> <tr><td>50</td><td>9.5 h</td><td>8.8 mm</td></tr> <tr><td>45</td><td>10.6 h</td><td>9.8 mm</td></tr> <tr><td>40</td><td>11.9 h</td><td>11.1 mm</td></tr> <tr><td>35</td><td>13.6 h</td><td>12.6 mm</td></tr> <tr><td>30</td><td>15.8 h</td><td>14.7 mm</td></tr> <tr><td>25</td><td>19.0 h</td><td>17.7 mm</td></tr> <tr><td>20</td><td>23.7 h</td><td>22.1 mm</td></tr> <tr><td>15</td><td>31.7 h</td><td>29.5 mm</td></tr> <tr><td>10</td><td>47.5 h</td><td>44.2 mm</td></tr> <tr><td>5</td><td>95.0 h</td><td>88.5 mm</td></tr> </table>			Vel (%)	Rotación	Lamina	100	4.7 h	4.4 mm	95	5.0 h	4.7 mm	90	5.3 h	4.9 mm	85	5.6 h	5.2 mm	80	5.9 h	5.5 mm	75	6.3 h	5.9 mm	70	6.8 h	6.3 mm	65	7.3 h	6.8 mm	60	7.9 h	7.4 mm	55	8.6 h	8.0 mm	50	9.5 h	8.8 mm	45	10.6 h	9.8 mm	40	11.9 h	11.1 mm	35	13.6 h	12.6 mm	30	15.8 h	14.7 mm	25	19.0 h	17.7 mm	20	23.7 h	22.1 mm	15	31.7 h	29.5 mm	10	47.5 h	44.2 mm	5	95.0 h	88.5 mm
Vel (%)	Rotación	Lamina																																																															
100	4.7 h	4.4 mm																																																															
95	5.0 h	4.7 mm																																																															
90	5.3 h	4.9 mm																																																															
85	5.6 h	5.2 mm																																																															
80	5.9 h	5.5 mm																																																															
75	6.3 h	5.9 mm																																																															
70	6.8 h	6.3 mm																																																															
65	7.3 h	6.8 mm																																																															
60	7.9 h	7.4 mm																																																															
55	8.6 h	8.0 mm																																																															
50	9.5 h	8.8 mm																																																															
45	10.6 h	9.8 mm																																																															
40	11.9 h	11.1 mm																																																															
35	13.6 h	12.6 mm																																																															
30	15.8 h	14.7 mm																																																															
25	19.0 h	17.7 mm																																																															
20	23.7 h	22.1 mm																																																															
15	31.7 h	29.5 mm																																																															
10	47.5 h	44.2 mm																																																															
5	95.0 h	88.5 mm																																																															

RECAASPICE®			REDISEÑO DE CARTAS DE ASPERSIÓN EN PIVOTE CENTRAL						
CARTA DE ASPERSION DEL EQUIPO									
UBICACIÓN			DATA HIDRAULICA				DESCRIPCION DE BOQUILLA		
Torre	No Salida	Distancia Punto pivote (m)	Caudal Requerido (m3-h)	Caudal Selección (m3-h)	Presion en punto (psi)	Presion de regulador (psi)	No Boquilla	Lamina Riego (mm)	Ganzo
1	6	7	0.266	0.293		15	14	4.9	1
1	12	13	0.336	0.343		15	15	4.5	2
1	15	16.3	0.315	0.343		15	15	4.8	3
1	18	19.6	0.379	0.388		15	16	4.5	4
1	21	22.9	0.414	0.438		15	17	4.7	5
1	24	25.8	0.470	0.485		15	18	4.6	6
1	27	29.1	0.571	0.611		15	20	4.7	7
1	30	32.5	0.637	0.661		15	21	4.6	8
1	33	35.8	0.692	0.733		15	22	4.7	9

Fuente: tomado de RECAASPICE (2020).

Figura 45A. Resumen del rediseño de la cartilla de aspersión en RECAASPICE.



CAPÍTULO III

SERVICIOS REALIZADOS EN APOYO A LAS ACTIVIDADES DE RIEGO DE LA
REGIÓN VII DEL INGENIO SANTA ANA, CHIKUIMULLA, SANTA ROSA.

4.1 PRESENTACIÓN

El departamento de Ingeniería Agrícola del Ingenio Santa Ana es el encargado de velar por una eficiente aplicación del riego en las distintas áreas de producción. Debido a que está dividida en 7 regiones de producción, es necesario que tenga representantes en cada región ; siendo dicha persona la que se encarga de ejecutar en campo las instrucciones giradas por el departamento.

Actualmente ya tiene actividades que ejecutan diariamente.. Dentro de estas actividades se encuentra la supervisión semanal de equipos de riego que consiste básicamente en evaluar el riego considerando distintas variables como lo es el área regada diaria, consumo del combustible en los equipos de bombeo, calidad técnica del riego y otras.

Así mismo, ejecuta periódicamente monitoreo de la humedad en situ utilizando una sonda de medición llamada TDR con sus siglas en Inglés “Time Domain Reflectometer”, esto con el objetivo de eficientar el riego y priorizar zonas de mayor demanda hídrica, ya que según el diagnóstico realizado la Región VII , no es capaz de proveerle la demanda total de la caña de azúcar según relaciones suelo-planta-agua en toda la extensión. Por último, el Departamento está encargado de diseñar los sistemas de riego de acuerdo a bloques de riego que cubren aproximadamente entre 80-100 ha cada uno.

El estudiante del programa EPSA, fue asignado a realizar estos 3 servicios durante la duración del programa, esto con el objetivo de apoyar el área de riego de la Región VII. Las metodologías empleadas fueron propuestas por el mismo departamento que ya cuenta con protocolos establecidos para la ejecución de estas actividades.

4.2 ÁREA DE INFLUENCIA

El área de influencia del estudiante de EPS fue la región VII . Estas regiones están divididas según su localización geográfica en el litoral Pacífico de Guatemala. La región VII, se encuentra ubicada en el municipio de Chiquimulilla, del departamento de Santa Rosa, teniendo un área cultivable de 3,941 ha hasta la zafra 2018-19. El apoyo a las actividades del riego se enfocó a la Región VII, que actualmente para su manejo del riego se ha dividido en bloques de riego de 80 ha – 100 ha aproximadamente cada uno, donde se espera que se ubique un equipo de riego por cada bloque existente. La figura 46 muestra el mapa de bloques de riego.

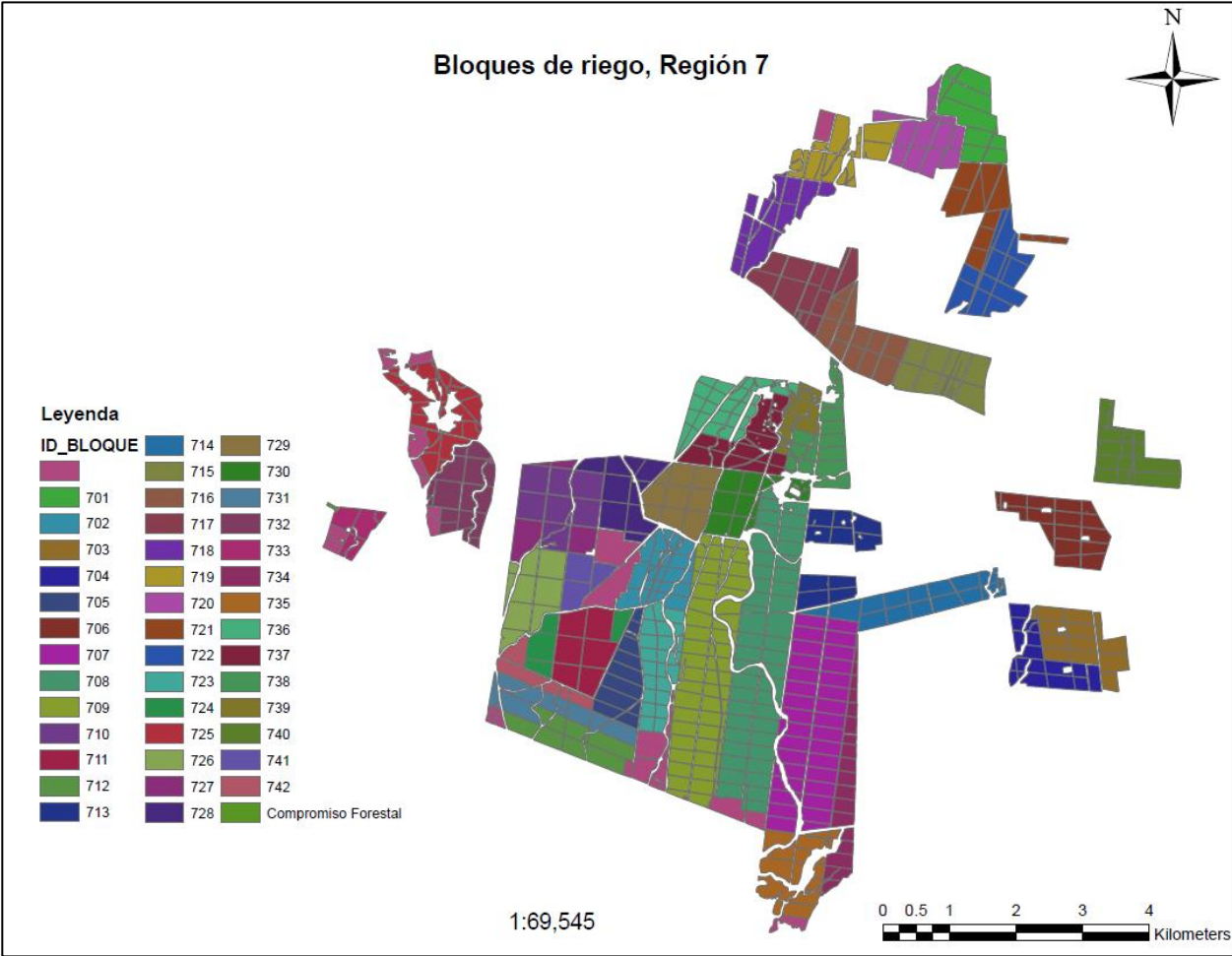


Figura 46. Bloques de riego de la región VII del ingenio Santa Ana.

4.3 OBJETIVOS GENERALES

1. Supervisar el funcionamiento del riego en la región VII
2. Diseñar los sistemas de riego en la región VII.
3. Monitorear la humedad del suelo.

4.4 SERVICIOS PRESTADOS

4.4.1 SUPERVISION DEL RIEGO EN LA REGIÓN VII

A. Definición del problema

Dentro de las actividades que implican el buen funcionamiento de los sistemas de riego, se encuentra el control por medio de la supervisión en la operación diaria de todos los equipos. El Ingenio Santa Ana, cuenta con un sistema esquematizado de supervisión, que se ha venido desarrollando desde la zafra 2015-16. El sistema ha consistido en la evaluación semanal del riego considerando diferentes variables que son los cumplimientos del rendimiento del riego respecto al área, considerando el número total de equipos, así mismo como rendimiento en el consumo de combustible en los diferentes equipos de bombeo, la calidad técnica de riego, y eficiencia del área de riego por cada hora operada.

Con el presente servicio se pretende continuar con la supervisión del riego en sistemas por aspersión móvil, mini aspersión, pivote central y avance frontal, garantizando que se cumplan con los requisitos técnicos establecidos por el departamento de Ingeniería Agrícola del Ingenio Santa Ana en la región VII.

B. Objetivos específicos

1. Determinar el cumplimiento del rendimiento semanal del riego.
2. Determinar el cumplimiento del rendimiento semanal del consumo de combustible en los equipos de bombeo.
3. Determinar el cumplimiento de la calidad técnica del riego
4. Determinar el cumplimiento de la eficiencia del área regada

C. Metodología

El ingenio posee un sistema informático que realiza el cálculo automático de las variables evaluadas, esto lo logra a través de la inscripción de características propias de operación individuales por equipo de bombeo.

Para todas las variables se propusieron “metas” que fueron los rendimientos esperados de las distintas variables, y se compararon con los rendimientos reales medidos a través de boletas de riego de campo, fuleo de los equipos de bombeo.

a. Cumplimiento del rendimiento (ha regadas/día)

Para el caso del cumplimiento semanal de las hectáreas regadas diarias, se consideró el número total de equipos inscritos en dicha semana. Por lo que la meta semanal de riego en ha/día sería la suma de la metas individuales de cada equipo de bombeo.

$$\text{Cumplimiento Rendimiento } \left(\frac{\text{ha}}{\text{día}}\right) = \sum \text{Metas individuales } \left(\frac{\text{ha}}{\text{día}}\right)$$

Para el cálculo de la meta individual se consideró el método de riego utilizado. Para el caso del riego por aspersión y mini aspersión se inició por establecer una meta diaria de horas de operación (jornada de riego), así mismo se consideró el tiempo de riego por turno en

(Mantener el margen izquierdo como el de la página anterior)

cada riego y a través de esto se determinó el número de turnos diarios a realizar. Para el cálculo de área, se inició con la determinación del marco de riego y el número de aspersores a utilizar en cada turno. En los sistemas de riego por pivote central y avance frontal la meta de riego individual, se estableció considerando las longitudes de los equipos y una velocidad de operación del mismo.

b. Cumplimiento del rendimiento de combustible (Gal/h)

El establecimiento de la meta del consumo de combustible se hizo a través de la eficiencia presupuestada para un equipo específico, del período anterior. Para el cálculo del rendimiento de combustible real se midió el consumo del combustible en galones después del último fuleo. Después se anotó el Horómetro final del motor y por diferencia con el horómetro inicial, se determinaron las horas reales operadas para ese fuleo.

$$\text{Rendimiento combustible} \left(\frac{\text{Gal}}{h} \right) = \frac{\text{Consumo durante el fuleo}}{\text{Horómetro inicial} - \text{horómetro final}}$$

c. Cumplimiento de la calidad técnica de riego

La calidad técnica del riego se evaluó a través de auditorías de campo. Se estableció una meta de 75 puntos en calidad de riego. Las auditorias consistieron en la verificación de parámetros establecidos de calidad, asignando una nota al final de la misma. La nota se ponderó de 0-100 puntos. Para la ejecución se procedió a realizar una fase de campo y una fase de gabinete.

i. Fase de campo

1. Se utilizó una libreta y un bolígrafo para hacer las anotaciones respectivas.

2. Se recorrió el lugar donde se encuentra operando el equipo de riego.
3. Se verificaron las RPM del motor según parámetros establecidos.
4. Se verificó la presión de salida de la bomba según parámetro establecido
5. Se recorrió toda la tubería desde el punto de bombeo hasta el aspersor crítico, verificando aspectos de limpieza, tubería ordenada, tubería sin quiebres, aspecto de caudal compartido y fugas presentes.
6. Se midió la presión del aspersor crítico con un Pitót incorporado a un manómetro.
7. Se verificó que la operación siga un diseño preestablecido, siempre y cuando se cuente con dicho diseño.



Fuente: elaboración propia, 2019.

Figura 47. Supervisión de riego por aspersión.

ii. Fase de gabinete

1. Con los datos recolectados, se ingresó al sistema de Ingeniería Agrícola y se ingresó los datos de la auditoria. La nota de 100 puntos se distribuyó según el cuadro 43:

Cuadro 43. Distribución de la nota de la auditoria de riego en equipos de bombeo.

Parámetro	Nota
Rpm del Motor	16.66 %
Psi de Salida Bomba	16.66 %
Psi del aspersor Critico	16.66 %
Diseño Acorde	7.14 %
En los aspersores uno se acerca y otro se aleja	7.14 %
Tubería sin quiebres	7.14 %
Tubería y accesorios ordenados	7.14 %
Fugas	7.14 %
Ambiente limpio	7.14 %
Accesorios ordenados	7.14 %
Total	100 %

Fuente: tomado de Departamento de Ingeniería Agrícola (2019).

2. Los parámetros de evaluación utilizados se describen a continuación:

- **Presión del aspersor:** Se tomo como bueno cuando el aspersor crítico tuvo una presión de trabajo de 40 psi al utilizar emisores Komet twin y Nelson F100, y 50 psi al utilizar emisores Nelson F150.
- **Presión de salida de la bomba:** Se tomo como bueno cuando la presión de salida esté entre 50 psi - 90 psi. Lo cual depende de la distancia a la cual se encuentre el aspersor crítico.
- **Revoluciones por minuto del motor:** Se considera la distancia desde el punto de bombeo hasta el aspersor más lejano. Las revoluciones deben de estar entre 1400 rpm – 1900 rpm.
- **Diseño acorde:** Si existe presencia de un diseño de riego preestablecido.

- **En los aspersores uno se acerca y otro se aleja:** Se considera este parámetro para la reducción de pérdidas por fricción y asegurar buena presión en los aspersores críticos.
- **Tubería sin quiebres:** La tubería debe estar lo más recta posible. Esto evita que se genere pérdidas de agua por las fugas.
- **Fugas:** la tubería puede estar quebrada, o por empaques en accesorios.
- **Ambiente limpio:** El área de riego deberá estar limpio. En la motobomba debe estar libre de prendas. La basura generada por artículos de consumo diario (botellas, golosinas) debe estar en un saco para su posterior quema.
- **Accesorios ordenados:** Los accesorios que estén libres, se colocarán en el área cercana a la motobomba. No pueden estar regados. Esto evita que se extravíen por algún motivo.

d. Cumplimiento de la eficiencia de riego (ha/h)

Para el cálculo de la eficiencia de riego, se utilizó la jornada de riego diaria en horas y las hectáreas regadas en ese período. Se obtuvo a través de la siguiente expresión:

$$Eficiencia \left(\frac{ha}{hr} \right) = \frac{hectáreas \text{ regadas en el día}}{horas \text{ operadas en el día}}$$

D. Resultados y discusión

En el cuadro 44 se presenta un resumen de la supervisión de riego de la semana uno evaluada con dos equipos operando

Cuadro 44. Resumen de la supervisión de riego de la semana uno evaluada con dos equipos operando.

Variable evaluada	Real	Meta	Cumplimiento
Cumplimiento rendimiento ha/día	6.27	8.26	76 %
Cumplimiento rendimiento combustible (Gal/h)	2.20	2.43	91 %
Cumplimiento calidad técnica de riego	89.47	75.00	100 %
Cumplimiento de ha/h (%)	0.17	0.24	71 %
Total			84 %

En el cuadro 44 se puede observar que el desempeño del riego fue de un 84 % para la semana uno. Se obtuvo un cumplimiento del rendimiento de ha/día del 76 %, así mismo un rendimiento del consumo de combustible del 91 %, se cumplió con la expectativa de la calidad técnica del riego, y se obtuvo un de eficiencia en ha/h del 71.

En el cuadro 45 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación durante la semana dos.

Cuadro 45 Resumen de la supervisión de riego de la semana dos evaluada con cuatro equipos operando.

Variable evaluada	Real	Meta	Cumplimiento
Cumplimiento rendimiento ha/día	12.91	16.52	78 %
Cumplimiento rendimiento combustible (gal/h)	2.14	2.36	91 %
Cumplimiento calidad técnica de riego	71.49	75	95 %
Cumplimiento de ha/h (%)	0.19	0.24	79 %
Total			86 %

En el cuadro 45 se puede observar que el desempeño del riego fue de un 86 % para la semana dos. Se obtuvo un cumplimiento del rendimiento de ha/día del 78 %, así mismo un rendimiento del consumo de combustible del 91 % igual a la semana uno , no se cumplió con la expectativa de la calidad técnica del riego obteniendo un cumplimiento del 95 %, y se obtuvo un cumplimiento de eficiencia en ha/h del 79 %.

En el cuadro 46 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación durante la semana tres.

Cuadro 46 Resumen de la supervisión de riego de la semana tres evaluada con 17 equipos operando.

Variable evaluada	Real	Meta	Cumplimiento
Cumplimiento rendimiento ha/día	52.52	70.21	75 %
Cumplimiento rendimiento combustible (Gal/h)	2.11	2.44	86 %
Cumplimiento calidad técnica de riego	78	75	100 %
Cumplimiento de ha/hr (%)	0.19	0.24	79 %
Total			85 %

En el cuadro 46 se puede observar que el desempeño del riego fue de un 85 % para la semana tres. Se obtuvo un cumplimiento del rendimiento de ha/día del 75 %, así mismo un rendimiento del consumo de combustible del 86 %, se cumplió con la expectativa de la calidad técnica del riego obteniendo un cumplimiento del 100 %, y se obtuvo un cumplimiento de eficiencia en ha/hr del 79 % igual a la semana anterior.

En el cuadro 47 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación durante la semana cuatro.

Cuadro 47 Resumen de la supervisión de riego de la semana cuatro evaluada con 23 equipos operando.

Variable evaluada	Real	Meta	Cumplimiento
Cumplimiento rendimiento ha/día	74.82	94.99	79 %
Cumplimiento rendimiento combustible (Gal/hr)	2.26	2.47	91 %
Cumplimiento calidad técnica de Riego	87.62	75.00	100 %
Cumplimiento de Ha/ hr (%)	0.20	0.24	83 %
Total			88 %

En el cuadro 47 se puede observar que el desempeño del riego fue de un 88 % para la semana cuatro. Se obtuvo un cumplimiento del rendimiento de ha/día del 79 %, así mismo un rendimiento del consumo de combustible del 91 %, se cumplió con la expectativa de la calidad técnica del riego obteniendo un cumplimiento del 100 %, y se obtuvo un cumplimiento de eficiencia en ha/hr del 83 % ligeramente superior a la semana anterior.

En el cuadro 48 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación durante la semana cinco.

Cuadro 48 Resumen de la supervisión de riego de la semana cinco evaluada con 31 equipos operando.

Variable evaluada	Real	Meta	Cumplimiento
Cumplimiento rendimiento ha/día	98.41	128.03	77 %
Cumplimiento rendimiento combustible (gal/h)	2.24	2.39	94 %
Cumplimiento calidad técnica de riego	94.12	75.00	100 %
Cumplimiento de ha/h (%)	0.17	0.24	71 %
Total			85 %

En el cuadro 48 se puede observar que el desempeño del riego fue de un 85 % para la semana cinco. Se obtuvo un cumplimiento del rendimiento de ha/día del 77 %, así mismo un rendimiento del consumo de combustible del 94 %, se cumplió con la expectativa de la

calidad técnica del riego obteniendo un cumplimiento del 100 %, y se obtuvo un cumplimiento de eficiencia en ha/hr del 71 %.

En el cuadro 49 se presenta el resumen generales de los resultados obtenidos de la evaluación durante las cinco semanas.

Cuadro 49. Resumen de resultados de supervisión en cinco semanas evaluadas.

Variable evaluada	Semana					Promedio
	1	2	3	4	5	
Cumplimiento rendimiento ha/día	76 %	78 %	75 %	79 %	77 %	77 %
Cumplimiento rendimiento combustible (gal/h)	91 %	91 %	86 %	91 %	94 %	91 %
Cumplimiento calidad técnica de riego	100 %	95 %	100 %	100 %	100 %	99 %
Cumplimiento de ha/h (%)	71 %	79 %	79 %	83 %	71 %	77 %
Promedio	85 %	86 %	85 %	88 %	86 %	86 %

En el cuadro 49 se observa el resumen de supervisión en cinco semanas evaluadas. Se observa que el cumplimiento general del rendimiento en ha/día fue del 77 %. El cumplimiento del rendimiento de combustible en gal/hr fue de 91 %. El cumplimiento de la calidad técnica de riego fue del 99 % y por último el cumplimiento de la eficiencia operativa en ha/hr fue de 77 %. En conjunto por medio de la supervisión en campo se obtuvo un cumplimiento del 86 % durante las 5 semanas evaluadas, por lo que se puede concluir que se está aplicando un excelente riego.

E. Evaluación

- a. Se determinó el cumplimiento del rendimiento semanal del riego en (ha/día) siendo este de un 77%.
- b. Se determinó el cumplimiento del rendimiento semanal del consumo de combustible en los equipos de bombeo en (gal/hr) siendo este de 91 %.
- c. Se determinó el cumplimiento de la calidad técnica del riego por medio de auditorías de campo siendo este del 99%.
- d. Se determinó el cumplimiento de la eficiencia del área regada en (ha/hr) siendo este del 77 %.
- e. En general se obtuvo un cumplimiento del 86% durante las 5 semanas evaluadas, por lo que se concluye que se está aplicando un excelente riego en la región VII.

F. Medios de verificación

FORMATO DE AUDITORIA EN CAMPO DE RIEGO

LABOR DE RIEGO POR ASPERSION

FECHA 16/03/21 REGION VII FINCA 1106 Los Aguacates TURNO PM

LOTES 303 A TIPO DE SUELO 7 Arcilloso RIEGO No. 7 VIENTO km/h

"VARIABLES" TIPO Pionero

HIDRANTES CENTRAL 2 TUBOS CENT 54 HIDRANTES LATERAL 7 TUBOS LATERALES 29

ANCHO DE SURCO (MTS) 1 TIEMPO DE RIEGO 3 Hrs. TENSION 6" 35 LATITUD 29

CODIGO MOTOBOMBA 294 0129 TENSION 12" 35 LONGITUD 29

1. PRESIONES DE OPERACIÓN Y RADIO DE MOJADO	NOTA	CERT	OP. M	PSI	OBSERVACIONES
A) TIPO DE ASPERSOR	<u>105</u>	<u>7</u>	<u>0</u>	<u>35</u>	
B) TIPO DE ASPERSOR	<u>105</u>	<u>7</u>	<u>0</u>	<u>35</u>	
1.2 RADIO DE MOJADO (MTS)	<u>0</u>	<u>7</u>	<u>1</u>	<u>29.46</u>	

2. PROFUNDIDAD DE MOJADO	MTS
ETAPA FENOLOGICA	<u>11eracio</u>
RANGO DE MOJADO	<u>15</u> <u>7</u> <u>51.65</u> <u>163.51</u>

3. RPM DE MOTOR Y PRESION DE SALIDA EN BOMBA	VARIABLES
DISTANCIA (Mts)	
MOTOR (RPM)	<u>10</u> <u>7</u> <u>1700</u>
BOMBA (PSI)	<u>15</u> <u>7</u> <u>70</u>

4. DISTRIBUCION DE TUBERIA Y ACCESORIOS	
DISEÑO ACORDE	<u>0</u> <u>7</u> <u>NO</u>
TUBERIA Y ACCESORIOS ORDENADOS	<u>3</u> <u>7</u> <u>SI</u>
FUGAS EN TUBERIA Y ACCESORIOS	<u>5</u> <u>7</u> <u>SI</u>
DIAMETRO DE TUBERIA LATERAL ACORDE A CAUDAL	<u>5</u> <u>7</u> <u>SI</u>
OPERACIÓN DE RIEGO	<u>5</u> <u>7</u> <u>Bueno</u>

5. ADECUACIÓN DE EQUIPO DE BOMBEO	
PROFUNDIDAD DE AGUA	<u>3</u> <u>7</u> <u>1.10</u>
ALTURA DE SUCCION (<3.5)	<u>3</u> <u>7</u> <u>2.00</u>
EQUIPO DE BOMBEO NIVELADO	<u>7</u> <u>7</u> <u>SI</u>
USO DE REJILLA	<u>7</u> <u>7</u> <u>SI</u>

6. LIMPIEZA Y ORDEN	
AMBIENTE LIMPIO ALREDEDOR	<u>78</u>
NOTA FINAL	<u>78</u>

DATOS METEOROLOGICOS	LECTURA A CADA 15 MINUTOS								PROMEDIO
VARIABLES	15	30	45	60	75	90	105	120	135
VEL. VIENTO Km/Hr	<u>8.40</u>	<u>5.70</u>	<u>3.10</u>	<u>2.0</u>	<u>3.60</u>				
DIRECCION	<u>S-U</u>	<u>S-U</u>	<u>S-U</u>	<u>S-N</u>	<u>S-U</u>				

OBSERVACIONES: NO

RESPONSABLE Asdrubal Turi CODIGO 69425 FIRMA [Firma]

Radio de mojados → Alta velocidad de viento

Causa Raíz

Fugas → Desgaste de accesorios.

Se están aportando accesorios para mandarlos a reparación

AUDITOR Jamilton Jimenez

Fuente: elaboración propia, 2019.

Figura 48. Constancia de la supervisión realizada a los equipos de riego.



Fuente: elaboración propia, 2019.

Figura 49. Supervisión del riego en Ingenio.



Fuente: elaboración propia, 2019.

Figura 50. Supervisión en el traslado de la motobomba para riego desde casco finca.

4.4.2 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE RIEGO PARA LA REGIÓN VII

A. Definición del problema

El diseño de riego es el estudio básico fundamental para la operación de un sistema de riego. En él se detalla los componentes agronómicos como láminas, frecuencias, tiempos de riego a aplicar al cultivo según relaciones suelo-planta-agua; también se especifican los parámetros de operación del equipo de bombeo en presiones; por último se encuentra el trazo de campo donde se detalla la forma de operación en campo del sistema.

La región VII del Ingenio para la operación de la zafra 2019-20, requirió que sus áreas contaran con un diseño de riego según sus bloques de riego. Sin embargo no todos los bloques tienen un diseño que respalde las láminas, frecuencia, tiempos de riego a aplicar. Con el presente servicio se elaboraron los diseños de riego en 9 bloques correspondientes de un área de 836.68 ha. Para ello se utilizó el sistema de riego por aspersión móvil tipo cañón.

B. Objetivos específicos

1. Determinar la lámina, frecuencia y tiempo de riego según diseño agronómico.
2. Realizar el trazo de campo del diseño de riego.
3. Determinar las características hidráulicas de operación del equipo del bombeo.

C. Metodología

Para la realización del diseño de riego de los equipos de aspersión móvil se procedió en fases: La primera fue el cálculo del **diseño agronómico**, que incluyó la determinación de las láminas, frecuencias y tiempos de riego; la segunda fue realizar el **trazo de campo** de la colocación de las tuberías principales, laterales y posiciones de los aspersores a utilizar. Por último se realizó el **diseño hidráulico** del equipo, que incluyó el cálculo de las pérdidas por fricción generadas en la conducción de agua a presión, y la presión de operación requerida por el equipo de bombeo.

a. Diseño Agronómico (láminas, frecuencias y tiempos de riego)

1. Para el cálculo del diseño agronómico se inició con la determinación del requerimiento hídrico de la caña conocida como lámina neta (L_n) que es igual la evapotranspiración máxima (ET_{max}) condicionado por el clima (E_{to}) y su etapa de desarrollo (k_c). Su cálculo se realizó por medio de la siguiente fórmula:

$$L_n = ET_{max} = E_{to} \times k_c$$

2. Seguidamente se determinó la capacidad del suelo para retener agua a la profundidad del sistema radicular del cultivo conocida como lámina de agua aprovechable (LAA). Siendo condicionado por sus propiedades físicas: capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PMP), densidad aparente (DAP) y profundidad radicular (ZR).

$$LAA = \frac{(CC - PMP)}{100} \times DAP \times ZR \times 10$$

3. A continuación se determinó la lámina a reponer después de cada riego, considerando que el cultivo no soporta más del 60% de pérdidas de agua (déficit permitido de manejo o dpm), de lo contrario entraría en un punto no retorno de marchitamiento. Esto se conoce como lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA).

$$LARA = LAA \times DPM$$

4. Considerando el consumo diario de agua del cultivo en la ET_{max} , y la cantidad de agua aplicada al suelo con la LARA en un riego se obtuvo la frecuencia de riego (FR) según las relaciones suelo-agua-planta.

$$FR = \frac{LARA}{ET_{max}}$$

5. A continuación se determinó la lámina bruta de agua en cada riego ($Lb/riego$) que tome en consideración las pérdidas de agua provocadas por el método empleado (Ef), así mismo como la frecuencia de riego fijada por el diseñador (FR_{aj}).

$$Lb/riego = \frac{ET_{max}}{Ef} \times FR_{aj}$$

6. Seguidamente se continuó con la determinación con las características del método de riego para proveer el requerimiento hídrico del cultivo. Se consideró utilizar aspersores marca Komet twin 101 los cuales descargan un caudal de 10.15 L/s cada uno. Después se calculó la cantidad de agua en lámina que el aspersor puede regar en un tiempo determinado conocida como Intensidad de riego (IR), esto fue condicionado por el caudal del aspersor (Q_e) y así mismo, el área de riego que tuviera asignada conocido como marco de riego (MC).

$$IR = \frac{Q_e}{MC}$$

7. Considerando la IR del método de riego, se procedió a calcular el tiempo de riego (TR). Este tomó en cuenta la $Lb/riego$ y la cantidad de agua aplicada por unidad de tiempo según método.

$$TR = \frac{Lb/riego}{IR}$$



Fuente: elaboración propia, 2019.

Figura 51. Visita de campo para cálculo de diseño agronómico.

b. Trazo de Campo

1. Haciendo uso de un software de dibujo digital (AUTOCAD). Se inició con la obtención de los mapas de las áreas de riego asignadas a cada equipo de bombeo.
2. A continuación se identificaron los puntos de abastecimiento de agua conocidos como puntos de bombeo (PB), del cual los equipos tomaron agua y la bombearon a través de la tubería de conducción.
3. Se dibujó el trayecto de las tuberías principales así como las laterales.
4. Se procedió dibujar las posiciones de los aspersores a lo largo de la tubería lateral.
5. Finalmente, se le agregaron márgenes al dibujo, las leyendas del mapa, y la información del diseño agronómico, hidráulico y el calendario de riego.



Fuente: elaboración propia, 2020.

Figura 52. Fase de gabinete en el diseño de riego.

c. Diseño Hidráulico

1. Para el diseño hidráulico, se inició con la determinación de la ruta crítica del diseño según trazo, que representó la longitud máxima desde el punto de bombeo hasta el aspersor más lejano ubicado en el último lateral. Además se consideró el desnivel altimétrico entre el aspersor más lejano y punto de bombeo.
2. A continuación se calculó las Perdidas de carga por fricción (H_f) en el lateral crítico considerando, el caudal a utilizar de acuerdo al número de aspersores utilizados, según la ecuación Hazen-Williams.

$$H_f = \frac{1.21 \times 10^{10}}{d^{4.87}} \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} \times L$$

3. Seguidamente, se calculó la presión requerida en el lateral crítico sumando el H_f , generados y la presión operación requerida del aspersor (P_e). Así mismo consideró el desnivel en dicha tubería.

$$PELC = P_e + h_f \text{ lateral} + \Delta h + \text{Altura elevador}$$

4. Seguidamente, se sumaron las perdidas por fricción generadas por la conducción del agua de los aspersores de la tubería lateral en la tubería principal (H_f principales). Su cálculo empleó la misma fórmula de Hazen-Williams.
5. Por último se calculó la presión de operación del diseño, sumando la P_e , y las perdidas por fricción generadas a lo largo de la tubería y las diferencia de nivel del área de riego.

$$Presion\ operación = PELC + H_f\ principal + Desnivel$$

D. Resultados y discusión

En el Cuadro 50 se presenta una descripción de los bloques de riegos diseñados en la ejecución de este servicio.

Cuadro 50. Descripción de los bloques de riego diseñados para la región VII del ingenio Santa Ana.

Descripción de bloques de riego Región vii, Ingenio Santa Ana					
Bloque de riego	Equipo	Área (ha)	Código de finca	Nombre de finca	Pantes
1	294-62	90.66	1811	Covadonga	100, 101, 102
15	294-183	96.03	1811	Covadonga	801, 900, 901, 902
16	294-177	94.86	1811	Covadonga	700, 701, 702, 800
17	294-149	101.68	1811	Covadonga	500, 501, 502, 503, 503A, 600
18	294-141	96.28	1811	Covadonga	405, 406, 406A, 407, 408, 409, 410, 411
19	294-138	88.02	1811	Covadonga	201, 202, 206, 300, 400, 401, 402, 403, 404
20	294-137	83.82	1811	Covadonga	200, 203, 204, 205, 207, 208, 209, 210
21	294-125	90.08	1106, 1811	Los Aguacates, Covadonga	208, 103, 104, 105, 1000
22	294-184	95.25	1811	Covadonga	1001A, 1001B, 1001C, 1002, 1003

En el Cuadro 50 se describen los bloques diseñados para la Región VII. Se observa la información de 9 bloques de riego que se han codificado por número y proporcionado por el departamento de Ingeniería Agrícola. Así mismo, se describe el código y correlativo de la motobomba utilizada para cada bloque, así como su área. En total se diseñó 836.68 ha. Los diseños de riego fueron distribuidos mayoritariamente en una finca Covadonga.

a. Determinación de la lámina, frecuencia y tiempo de riego según diseño agronómico

En el cuadro 51 se muestra los resultados obtenidos en el diseño agronómico del cultivo determinando láminas de riego, frecuencias de riego y tiempos de riego.

Cuadro 51. Calendario de riego para el diseño de la motobomba 294-0062 correspondiente al bloque 1 de riego.

Etapas	Duración etapa (días)	Tiempo de riego (h)	Lamina de riego (mm)	Frecuencia de riego (días)
Riego de llenado	0	2.50	57	-
Iniciación	30	1.50	34	16
Macollamiento	60	2	45	21
Elongación I	135	2.50	57	27
Elongación II	95	2.50	57	27

Considerando las relaciones suelo-planta-agua y la etapa fenológica del cultivo, se estableció que: Durante el riego de llenado (al momento de siembra), se aplique una lámina de riego de 57 mm, que serán aplicados por un aspersor Komet twin a un marco de riego de 45 m x 36 m en un período de 2.50 hr. Así mismo se determinó que para la etapa de iniciación es necesario aplicar 34 mm de agua en un tiempo de 1.50 hr. Por su parte en la etapa de macollamiento se determinó aplicar una lámina de riego de 45 mm, y un

tiempo de riego de 2 horas. Por último en las etapas de elongación I y II, se requiere una lámina de 57 mm y un tiempo de aplicación de 2.50 hr.

Las frecuencias de riego fueron variables dependiendo el área de riego según bloque, por lo que variaron desde los 20 hasta los 29 días entre cada riego.

b. Realización del trazo de campo del diseño de riego.

La figura 53 muestra el trazo realizado para el diseño de riego del bloque 1 según la descripción.



Figura 53. Trazo de campo para el diseño de riego de la motobomba 294-0062 correspondiente al bloque de riego uno.

En la figura 53 se observa el trazo de campo para el bloque de riego uno . Se observa que el sistema móvil tendrá 4 puntos de abastecimiento de agua conocidos como puntos de bombeo. También se observan la distribución de accesorios en el bloque. Así mismo las flechas detallan la dirección a llevar durante el movimiento de tuberías. Además el mapa incluye el resumen del diseño agronómico contenidos en el calendario de riego, así mismo como la simbología del mapa y los parámetros hidráulicos de operación del equipo de bombeo.

c. **Determinación las características hidráulicas de operación del equipo del bombeo**

En el cuadro 52 se presenta los resultados obtenidos del diseño hidráulico para los sistemas diseñados.

Cuadro 52. Parámetros hidráulicos de operación de la motobomba 294-0062 para el bloque de riego uno .

Revoluciones del motor	1,750 rpm
Presión de operación	75 psi
Presión ultimo aspersor	40 psi
Numero aspersores operando	3 asp
Numero aspersores lateral	3 asp
Turnos por día	8
Horas por turno	2.50
Tipo de aspersor	Komet twin
Marco de riego	45 m x 36 m

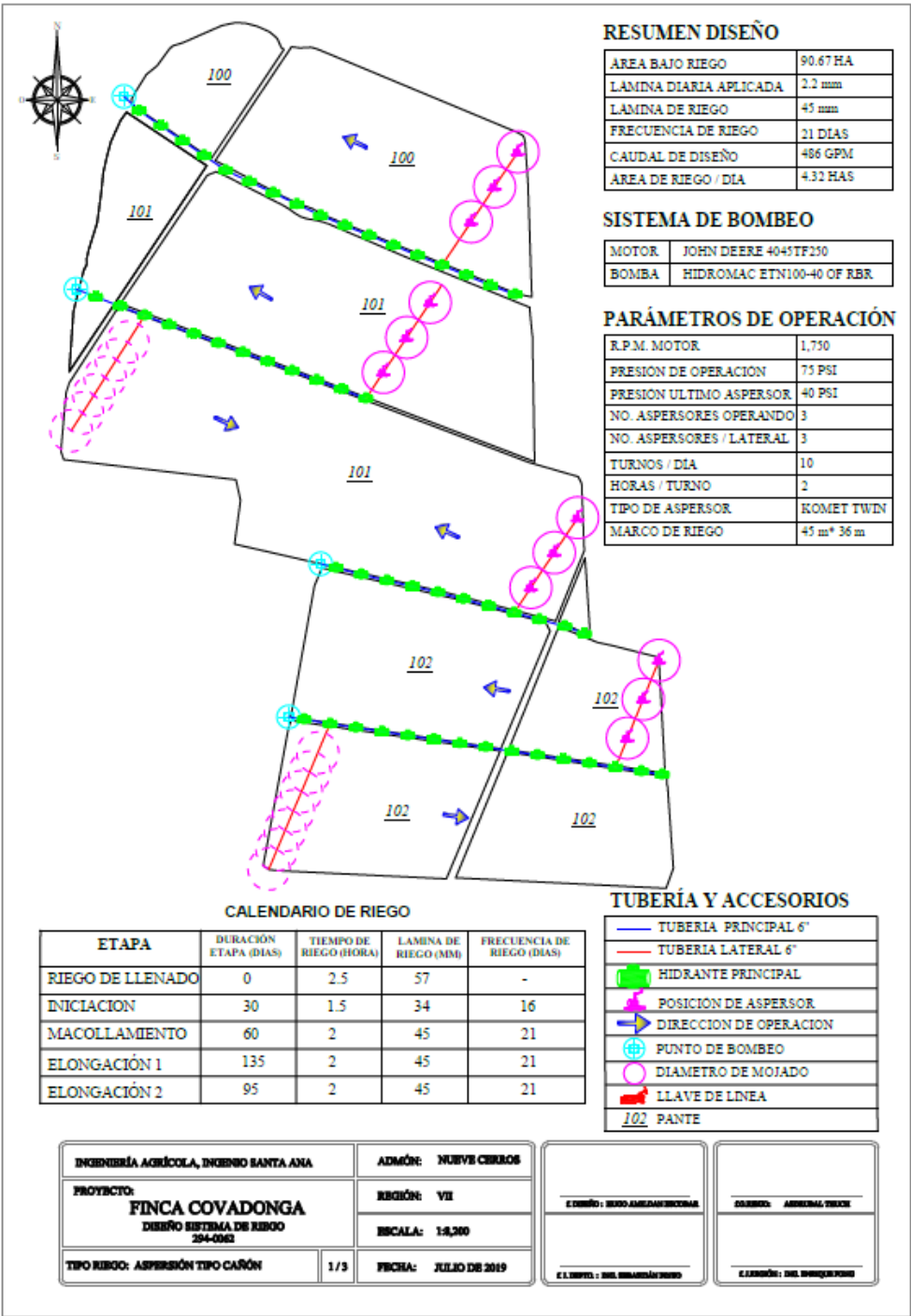
En el cuadro 52 se observa los parámetros de operación utilizados para el correcto funcionamiento del equipo de bombeo. Se le estableció una presión de operación de 75 psi (sin embargo para los demás diseños vario entre 70 psi - 90 psi dependiendo la ruta

crítica), es decir esta es la operación que debe de tener en la salida de la bomba centrífuga de la motobomba. Así mismo, el aspersor crítico (el más lejano) según trazo, debe operar a una presión de 40 psi (estos datos fueron tomados directos de la presión requerida según fabricante). Durante toda la operación la motobomba 294-0062 deberá operar con 3 aspersores marca Komet twin simultáneamente a un marco de riego de 45 m x 36 m. Además deberá aplicar 2.50 horas de riego en la etapa de elongación I y II.

E. Evaluación

1. Se determinaron las láminas de riego por etapa fenológica del cultivo siendo de 34 mm en iniciación, 45 mm en macollamiento y 57 mm en elongación I y II. Las frecuencias de riego fueron de 16 días para iniciación, 21 días para macollamiento y 27 días para elongación I y II. Por último los tiempos de riego considerando el marco de riego de 45 m x 36 m y la intensidad de riego según el aspersor Komet twin, el tiempo de riego para iniciación fue de 1.50 h, 2 h para macollamiento y 2.50 h para elongación I y II.
2. Realizar el trazo de campo del diseño de riego en 9 diferentes bloques de riego de la región VII para sumar un área total de 836.88 ha.
3. Se determinaron las características hidráulicas de operación del equipo del bombeo. Los sistemas de riego diseñados requirieron que el motor se opere a 1,750 rpm, una presión de operación de 75 psi, una presión en el aspersor más lejano de 40 psi, con 3 aspersores operando en el mismo lateral, haciendo un total de 8 turnos por día de 24 hr a un marco de riego de 45 m x 36 m.

F. Medios de verificación



Fuente: elaboración propia, 2019.

Figura 54. Constancias del diseño de riego realizado.



Fuente: elaboración propia, 2020.

Figura 55. Implementación del diseño de riego en finca.

4.4.3 MONITOREO DE LA HUMEDAD CON LA SONDA TDR

A. Definición del problema

De acuerdo al diagnóstico realizado, la región VII del Ingenio Santa Ana, tiene un requerimiento hídrico de $4.93 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal para satisfacer las necesidades de agua del cultivo de caña de azúcar, sin embargo al realizar un balance hídrico se determinó que existen únicamente dos fuentes de agua que proveen en conjunto $3.10 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal (deriva de río y pozo mecánico). Sin embargo, la capacidad de riego de la región considerando los equipos de bombeo es de $1.82 \text{ m}^3/\text{s}$. En resumen hace falta agua para poder satisfacer los requerimientos del cultivo de la caña de azúcar. Por lo anterior, se debe hacer un uso eficiente del recurso agua

Este servicio tiene el enfoque de alternativa de control en la aplicación de riego, distribución del agua a nivel de parcela y ajuste de las frecuencias de riego en las distintas etapas de desarrollo del cultivo, en sistemas de riego de frecuencias fijas o libres. Para tal fin, se presenta la siguiente actividad que es el monitoreo de humedad en situ utilizando un método indirecto llamado TDR con sus siglas en I inglés “Time domain reflectometer”.

Con el uso del TDR se dispuso determinar el contenido de humedad del suelo de los diferentes lotes de producción, así mismo como presentar el área monitoreada durante la temporada de zafra 2018-19.

B. Objetivos específicos

1. Determinar el contenido de humedad del suelo utilizando la sonda TDR
2. Presentar la cantidad de área monitoreada durante la zafra 2018-19.

C. Metodología

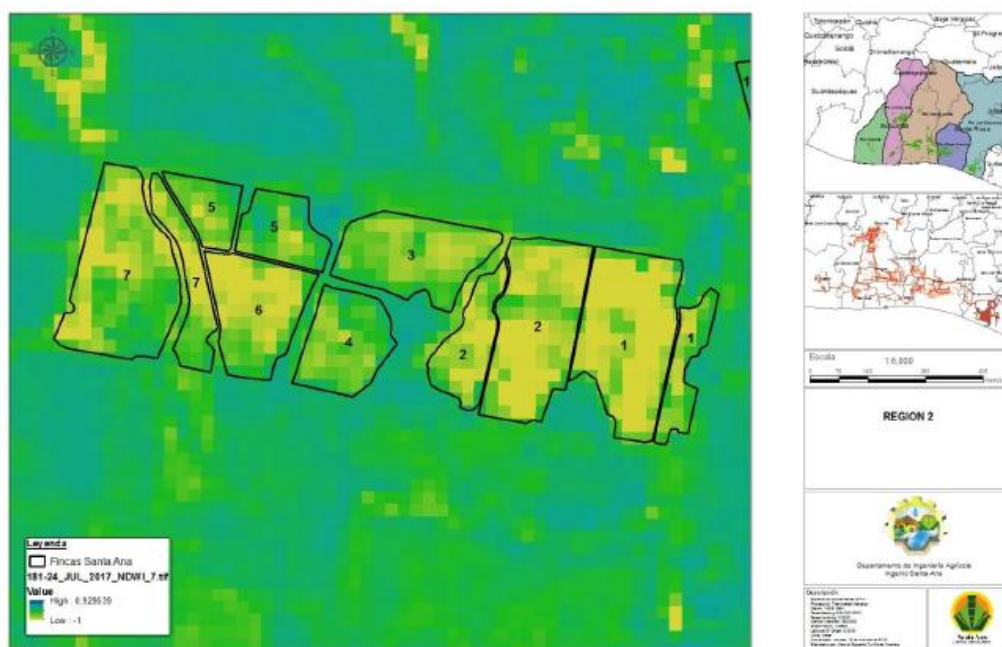
La actividad se realizó semanalmente durante la zafra 2018-19. Se inició primeramente con los muestreos de campo, para luego analizar la información y presentarla semanalmente al encargado de campo para la toma de decisiones.

a. Determinación de la humedad del suelo utilizando la sonda TDR

La determinación de la humedad se realizó en tres fases. La primera fue la etapa de campo donde se estuvo la información primaria, la segunda fue el análisis de la información y tercera la generación del informe de lo realizado.

i. Fase de campo

1. Primeramente se conocieron las áreas críticas de humedad en las extensiones de cultivo, esto para que resulte representativo la medición general. Se hizo uso de las imágenes satelitales de tipo NDWI y MSI que permite visualizar áreas con estrés hídrico. Dichas imágenes se obtienen cada 16 días con el satélite Landsat 8 y con ello priorizar los puntos de muestreo. Como se muestra en la figura 56.



Fuente: Ingenio Santa Ana (2018).

Figura 56. Imágenes satelitales NWI y MSI.

2. Situados en el punto de muestreo, se procedió a encender la sonda en el botón “ON/OFF” ubicado en el panel de control.
3. Debido a que la sonda trabaja con sistema GPS, para geo-referenciar la posición de muestreo, se debe esperar que el indicador de señal del GPS esté en “negrita” en el panel de control, esto indica que se han captado suficientes satélites y está lista para la medición.
4. Se debe introducir el TDR en el punto de muestreo, procurando que un par de varillas con las que viene provisto queden completamente enterradas, así como se muestra en la figura 57.



Fuente: elaboración propia, 2019.

Figura 57. Introducción de la sonda al punto seleccionado.

5. Se procedió a tomar la muestra presionando la tecla “READ” ubicada en el panel de control, para ello debe tenerse cuidado en realizar una sola medición en una fecha y hora, al momento de tomar el dato se debe apuntar en la libreta de campo, ya que después será de utilidad al momento del análisis de los mismos.



Fuente: elaboración propia, 2019.

Figura 58. Pantalla principal y mandos de la sonda de humedad tdr-350.

6. Tomada la cantidad de muestras de interés, se procedió a recopilar los datos generados. Para ellos se utilizó una memoria USB completamente vacía que se conectó a una ranura específica para ello ubicada en la parte trasera de los mandos de la sonda.
7. Ingresó al menú principal a través del botón “MENU”, y luego con los botones de desplazamiento se ubicó la opción “SAVE TO USB” luego se dio “SELECT”. A continuación se apagó la sonda y se retiró la USB ”.
8. En la memoria se almacena un documento Excel con formato “csv delimitado por comas” en él se encuentra toda la información generada por la sonda.

ii. Análisis de datos

1. La sonda genera y guarda la información exactamente como el cuadro 53:

Cuadro 53. Formato de guardado de información generada por la sonda TDR en el archivo csv de excel.

Time	VWC%	Period	EC	Temp_Soil	Temp_Soil(F)	Temp_IR	Temp_IR(F)	Latitude	Longitude	Satellites	Fix	Rod Length	Soil Type	VWC Mode
19/12/2018 8:33	20.3	2911	0.11	27.2	81	----	----	1351.9291 N	09021.8557 V	8	1 L	S	S	V
19/12/2018 8:36	7.5	2454	0	28.3	83	----	----	1351.9230 N	09021.8791 V	8	1 L	S	S	V
19/12/2018 11:57	33.4	3383	0.26	36.7	98.1	----	----	1354.6035 N	09020.1343 V	3	1 L	S	S	V
19/12/2018 11:58	35	3449	0.29	36.5	97.7	----	----	1354.5947 N	09020.1222 V	5	1 L	S	S	V
19/12/2018 12:01	15.6	2741	0.08	36.5	97.8	----	----	1354.5241 N	09020.1452 V	6	1 L	S	S	V
19/12/2018 12:03	18.7	2858	0.12	36.5	97.8	----	----	1354.5022 N	09020.1568 V	6	1 L	S	S	V
19/12/2018 12:19	55.2	4211	0.56	37.3	99.2	----	----	1354.4276 N	09020.7515 V	5	1 L	S	S	V
19/12/2018 12:20	42.8	3728	0.37	37.2	99	----	----	1354.3915 N	09020.7655 V	7	1 L	S	S	V
19/12/2018 12:21	52.9	4185	0.63	37.2	98.9	----	----	1354.3706 N	09020.7775 V	7	1 L	S	S	V
19/12/2018 12:35	34.2	3415	0.27	38.3	101	----	----	1354.3726 N	09020.4029 V	3	1 L	S	S	V
19/12/2018 12:39	28.7	3214	0.22	38.6	101.5	----	----	1354.4438 N	09020.3417 V	6	1 L	S	S	V
19/12/2018 12:42	38.9	3589	0.33	39.3	102.8	----	----	1354.5227 N	09020.2971 V	6	1 L	S	S	V
19/12/2018 12:43	32.5	3357	0.2	39.1	102.5	----	----	1354.5362 N	09020.2997 V	7	1 L	S	S	V

2. La información contenida en las columnas es la siguiente: “Time” es la fecha del muestreo así como la hora. “VWC% con sus siglas en ingles Volume Water Content” que es el contenido volumétrico del agua en porcentaje siendo este el **dato de interés**. “Period” que es el período de frecuencia de la medición. “EC del inglés electrical conductivity” que es la conductividad eléctrica del suelo. “Temp Soil” temperatura del suelo tanto en grados C° y F°. “Latitude” y “Longitude” que son las coordenadas del punto de muestreo. “Satellites” siendo el número de satélites captados para la georreferenciación del muestreo. “Fix” es el ajuste. “Rod Length” es la longitud de las

varillas. “Soil type” es el tipo de calibración utilizada para un tipo de suelo. “VWC Mode” el modo de medición de contenido de agua.

3. Para la determinación de la humedad de un área respectiva es necesario considerar todos los puntos muestreados en un área específica. A continuación se procede a realizar un promedio aritmético de VWC de los puntos de interés. Este resultado se toma como la humedad representativa del área muestreada y se presenta en porcentaje de humedad del suelo.
4. A continuación se procede a comparar el resultado de la sonda TDR con las constantes de humedad del suelo que son específicas para cada lote siendo estas la CC (Capacidad de Campo) y PMP (Punto de Marchitez Permanente) y el DPM (Déficit Permitido de Manejo).
5. Para la comparación se determinaron cuatro niveles de humedad siendo estos el nivel óptimo, bueno, regular y bajo. Para su cálculo se consideró la cantidad de agua que el suelo puede retener siendo la diferencia entre CC y PMP.
6. Conociendo la cantidad de agua disponible, se consideró que el cultivo no puede perder un máximo del 60% del total (DPM). El nivel bajo de humedad se estableció cuando el WVC estuviera igual o por debajo del DPM. Los niveles óptimo, bueno y regular se establecieron a partir de la cantidad de agua rápidamente aprovechable.

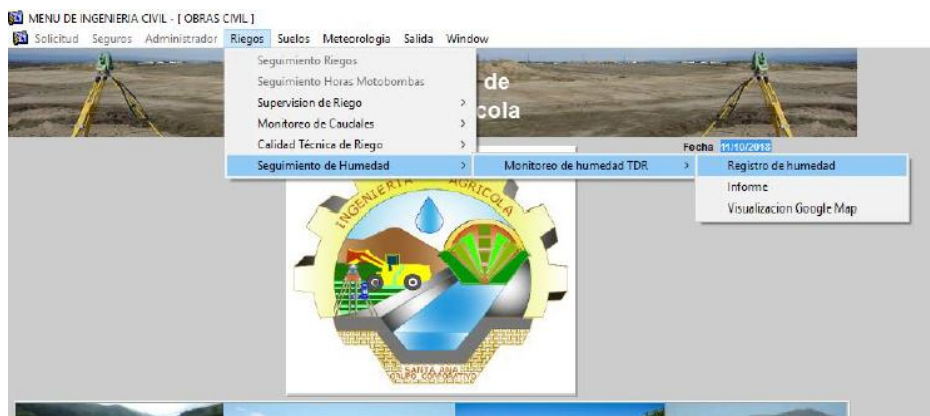
iii. Presentación de resultados

1. Para esto se hizo uso de la plataforma que el Ingenio tiene establecida para generar el informe de la humedad monitoreada con la sonda TDR.
2. Para realizarlo hizo falta agregar tres columnas al documento csv delimitado por comas de Excel. Se agregó las columnas “Finca”, “Pante” y “División” que son específicas para las áreas de producción del Ingenio.

Cuadro 54. Formato de la base de datos de resultados generada para subir al sistema.

Finca	Pante	Division	Time	VWC%	Period	EC	Temp_Soil	Temp_Soil(F)	Temp_IR	Temp_IR(F)	Latitude	Longitudo	Satellites	Fix	Rod	Length	Soil Type	VWC Mode
1105	417		19/12/2018 8:33	20.3	2911	0.11	27.2	81	----	----	1351.9291 N	09021.8557 V	8	1	L		S	V
1105	417		19/12/2018 8:36	7.5	2454	0	28.3	83	----	----	1351.9230 N	09021.8791 V	8	1	L		S	V
1104	204		19/12/2018 11:57	33.4	3383	0.26	36.7	98.1	----	----	1354.6035 N	09020.1343 V	3	1	L		S	V
1104	204		19/12/2018 11:58	35	3449	0.29	36.5	97.7	----	----	1354.5947 N	09020.1222 V	5	1	L		S	V
1104	204		19/12/2018 12:01	15.6	2741	0.08	36.5	97.8	----	----	1354.5241 N	09020.1452 V	6	1	L		S	V
1104	204		19/12/2018 12:03	18.7	2858	0.12	36.5	97.8	----	----	1354.5022 N	09020.1568 V	6	1	L		S	V
1104	105		19/12/2018 12:19	55.2	4211	0.56	37.3	99.2	----	----	1354.4276 N	09020.7515 V	5	1	L		S	V
1104	105		19/12/2018 12:20	42.8	3728	0.37	37.2	99	----	----	1354.3915 N	09020.7655 V	7	1	L		S	V
1104	105		19/12/2018 12:21	52.9	4185	0.63	37.2	98.9	----	----	1354.3706 N	09020.7775 V	7	1	L		S	V
1104	203		19/12/2018 12:35	34.2	3415	0.27	38.3	101	----	----	1354.3726 N	09020.4029 V	3	1	L		S	V
1104	203		19/12/2018 12:39	28.7	3214	0.22	38.6	101.5	----	----	1354.4438 N	09020.3417 V	6	1	L		S	V
1104	203		19/12/2018 12:42	38.9	3589	0.33	39.3	102.8	----	----	1354.5227 N	09020.2971 V	6	1	L		S	V
1104	203		19/12/2018 12:43	32.5	3357	0.2	39.1	102.5	----	----	1354.5362 N	09020.2997 V	7	1	L		S	V

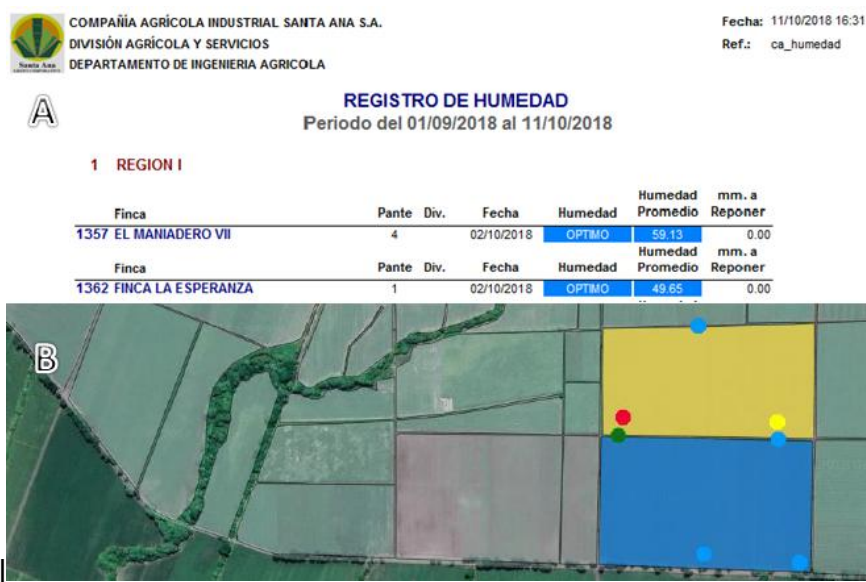
3. Ahora se ingresa la información al sistema del Ingenio. En la pestaña Riegos se ingresa a seguimiento de humedad para luego en monitoreo de TDR y por último en registro de humedad como se muestra en la figura 59.



Fuente: tomado de Ingenio Santa Ana (2019).

Figura 59. Pantalla principal del sistema del ingenio donde se ingresa la información del TDR.

4. Por defecto el sistema genera los resultados y presenta un informe gráfico y un registro de humedad como se muestra en la figura 60.



Fuente: Tomado de Ingenio Santa Ana (2019).

Figura 60. Informe generado en el sistema del ingenio para el monitoreo de humedad con sonda tdr. A: muestra los resultados del registro de humedad; la B, muestra de manera gráfica la humedad y así mismo los puntos donde se tomó el muestreo.

iv. Presentación de la cantidad de área monitoreada durante la zafra 2018-19.

Para esto se sumó el área de cada pante (lote de producción) monitoreado. Si un pante fue monitoreado dos veces, el área total de muestreo lo tomó en cuenta.

D. Resultados y discusión

a. Determinación de la humedad del suelo utilizando la sonda TDR

En el cuadro 55 se muestran los resultados obtenidos del monitoreo de humedad con sonda TDR.

Cuadro 55. Resultados del monitoreo de humedad con la sonda TDR durante la zafra 2018-19.

NO.	FECHA	NOMFIN	PANTE	DIV	%VWC	NIVEL
1	4/10/2018	LA MAQUINA	106		23.50	BAJO
2	4/10/2018	LA MAQUINA	108		28.53	BUENO
3	4/10/2018	LA MAQUINA	115		29.55	OPTIMO
4	4/10/2018	LA MAQUINA	208		31.98	OPTIMO
5	5/10/2018	LOS AGUACATES	202	B	37.74	OPTIMO
6	16/11/2018	NUEVE CERROS	101		33.22	BUENO
7	16/11/2018	NUEVE CERROS	105		42.03	OPTIMO
8	16/11/2018	NUEVE CERROS	203		42.25	OPTIMO
9	16/11/2018	LA MAQUINA	115		19.43	BAJO
10	16/11/2018	LA MAQUINA	208		36.02	OPTIMO
11	16/11/2018	LOS AGUACATES	202	B	29.20	BUENO
12	16/11/2018	LOS AGUACATES	204	A	32.70	BUENO
13	16/11/2018	LOS AGUACATES	204	B	43.73	OPTIMO
14	17/11/2018	NUEVE CERROS	405		42.80	OPTIMO
15	17/11/2018	NUEVE CERROS	406		31.37	BUENO
16	17/11/2018	LOS AGUACATES	108	B	31.58	OPTIMO
17	17/11/2018	LOS AGUACATES	308		40.60	OPTIMO
18	21/11/2018	LA MAQUINA	115		36.36	OPTIMO
19	22/11/2018	LA MAQUINA	103	A	34.20	OPTIMO
20	22/11/2018	LA MAQUINA	107		26.22	BUENO
21	3/12/2018	NUEVE CERROS	305		28.20	BAJO
22	3/12/2018	LOS AGUACATES	122		27.83	OPTIMO
23	3/12/2018	COVADONGA	101		19.50	OPTIMO
24	3/12/2018	COVADONGA	102		42.80	OPTIMO
25	3/12/2018	VERSALLES	14		25.90	BAJO
26	19/12/2018	NUEVE CERROS	105		50.30	OPTIMO
27	19/12/2018	NUEVE CERROS	203		33.58	BUENO
28	19/12/2018	NUEVE CERROS	204		25.68	BAJO
29	19/12/2018	LA MAQUINA	208		24.65	REGULAR
30	19/12/2018	LA MAQUINA	210		31.40	OPTIMO
31	19/12/2018	LA MAQUINA	417		13.90	BAJO
32	19/12/2018	LOS AGUACATES	301		9.03	BAJO
33	19/12/2018	COSTA RICA	9		32.05	BAJO
34	19/12/2018	COVADONGA	407		24.58	REGULAR
35	19/12/2018	COVADONGA	702		26.53	REGULAR
36	19/12/2018	COVADONGA	1001	C	29.05	OPTIMO
37	19/12/2018	VERSALLES	1		23.25	BAJO
38	19/12/2018	VERSALLES	5		26.90	BAJO
39	15/01/2019	LOS AGUACATES	202	B	28.63	BUENO
40	15/01/2019	COSTA RICA	2		28.45	BAJO

Continuación cuadro 55...

NO.	FECHA	NOMFIN	PANTE	DIV	%VWC	NIVEL
41	15/01/2019	COSTA RICA	9		25.23	BAJO
42	15/01/2019	COSTA RICA	10		15.85	BAJO
43	15/01/2019	LA SONRISA	8		31.17	REGULAR
44	15/01/2019	VERSALLES	1		31.27	REGULAR
45	15/01/2019	VERSALLES	10		22.83	BAJO
46	16/01/2019	LOS AGUACATES	308		29.54	OPTIMO
47	16/01/2019	COVADONGA	202		28.45	OPTIMO
48	16/01/2019	COVADONGA	403		29.68	OPTIMO
49	16/01/2019	COVADONGA	1001	C	30.95	OPTIMO
50	17/01/2019	NUEVE CERROS	202		18.28	BAJO
51	17/01/2019	NUEVE CERROS	203		27.35	BAJO
52	17/01/2019	NUEVE CERROS	205		28.57	BAJO
53	17/01/2019	NUEVE CERROS	206		30.78	REGULAR
54	17/01/2019	NUEVE CERROS	303		31.27	REGULAR
55	17/01/2019	NUEVE CERROS	305		27.15	BAJO
56	17/01/2019	NUEVE CERROS	404		26.40	BAJO
57	17/01/2019	NUEVE CERROS	406		20.38	BAJO
58	17/01/2019	LA MAQUINA	700	B	31.80	BUENO
59	17/01/2019	LA MAQUINA	115		19.08	BAJO
60	17/01/2019	LA MAQUINA	404		27.30	REGULAR
61	17/01/2019	LA MAQUINA	406		19.08	BAJO
62	17/01/2019	LA MAQUINA	407		23.98	BAJO
63	17/01/2019	LA MAQUINA	410		21.45	BAJO
64	17/01/2019	LA MAQUINA	413	B	27.93	BUENO
65	17/01/2019	LA MAQUINA	417		24.55	REGULAR
66	17/01/2019	LA MAQUINA	418		23.30	REGULAR
67	17/01/2019	LA MAQUINA	502		29.13	REGULAR
68	17/01/2019	LA MAQUINA	605		28.23	REGULAR
69	30/01/2019	LA MAQUINA	105		21.03	BAJO
70	30/01/2019	LA MAQUINA	107		20.42	BAJO

NO.	FECHA	NOMFIN	PANTE	DIV	%VWC	NIVEL
71	30/01/2019	LA MAQUINA	204		21.73	BAJO
72	30/01/2019	LA MAQUINA	215		20.70	BAJO
73	30/01/2019	COVADONGA	105		22.78	OPTIMO
74	30/01/2019	COVADONGA	407		25.93	REGULAR
75	30/01/2019	COVADONGA	410		32.45	REGULAR
76	30/01/2019	VERSALLES	3		14.85	BAJO
77	30/01/2019	VERSALLES	4		24.83	BAJO
78	30/01/2019	VERSALLES	13		21.25	BAJO
79	30/01/2019	VERSALLES	14		25.00	BAJO
80	30/01/2019	VERSALLES	15		26.98	BAJO
81	30/01/2019	VERSALLES	16		30.80	BAJO
82	31/01/2019	LA MAQUINA	600		30.67	BUENO
83	31/01/2019	LA MAQUINA	402		26.68	REGULAR
84	31/01/2019	LA MAQUINA	403		25.30	BAJO
85	31/01/2019	LA MAQUINA	404		25.55	BAJO
86	31/01/2019	LA MAQUINA	405		20.65	BAJO
87	31/01/2019	LA MAQUINA	410		28.28	BUENO
88	31/01/2019	LA MAQUINA	413	A	28.85	BUENO
89	31/01/2019	LA MAQUINA	413	B	28.00	BUENO
90	31/01/2019	LA MAQUINA	416		23.90	BAJO
91	31/01/2019	LA MAQUINA	602		16.80	BAJO
92	31/01/2019	LA MAQUINA	607		28.80	REGULAR
93	31/01/2019	LOS AGUACATES	108	B	12.63	BAJO
94	31/01/2019	LOS AGUACATES	121		47.03	OPTIMO
95	31/01/2019	LOS AGUACATES	122		29.43	OPTIMO
96	31/01/2019	LOS AGUACATES	123		42.00	OPTIMO
97	31/01/2019	LOS AGUACATES	204	B	28.35	REGULAR
98	31/01/2019	LOS AGUACATES	207		25.08	BAJO
99	31/01/2019	LAS FLORES I	3		35.73	OPTIMO
100	14/02/2019	COVADONGA	100		13.90	REGULAR

Continuación cuadro 55...

NO.	FECHA	NOMFIN	PANTE	DIV	%VWC	NIVEL
101	14/02/2019	COVADONGA	300		20.35	REGULAR
102	14/02/2019	COVADONGA	800		28.35	BUENO
103	14/02/2019	COVADONGA	101		19.75	OPTIMO
104	14/02/2019	COVADONGA	102		29.23	OPTIMO
105	14/02/2019	COVADONGA	203		28.05	OPTIMO
106	14/02/2019	COVADONGA	207		25.50	OPTIMO
107	14/02/2019	COVADONGA	702		22.25	BAJO
108	14/02/2019	COVADONGA	801		27.98	BUENO
109	14/02/2019	COVADONGA	1001	B	20.98	BAJO
110	14/02/2019	COVADONGA	1002		27.10	BUENO
111	14/02/2019	COVADONGA	1003		29.38	BUENO
112	15/02/2019	LA MAQUINA	500		28.58	REGULAR
113	15/02/2019	LA MAQUINA	103		14.78	BAJO
114	15/02/2019	LA MAQUINA	105		19.80	BAJO
115	15/02/2019	LA MAQUINA	107		17.93	BAJO
116	15/02/2019	LA MAQUINA	109		16.63	BAJO
117	15/02/2019	LA MAQUINA	113		25.70	BUENO
118	15/02/2019	LA MAQUINA	115		26.80	BUENO
119	15/02/2019	LA MAQUINA	211		28.53	BUENO
120	15/02/2019	LA MAQUINA	213		28.38	BUENO
121	15/02/2019	LA MAQUINA	406		21.68	BAJO
122	15/02/2019	LA MAQUINA	408		17.58	BAJO
123	15/02/2019	LA MAQUINA	409		21.38	BAJO
124	15/02/2019	LA MAQUINA	411		24.18	BAJO
125	15/02/2019	LA MAQUINA	504		31.30	BUENO
126	15/02/2019	LA MAQUINA	505		28.73	REGULAR
127	15/02/2019	LA MAQUINA	601		26.77	BAJO
128	15/02/2019	LA MAQUINA	605		27.43	REGULAR
129	15/02/2019	COVADONGA	407		22.70	BAJO
130	15/02/2019	COVADONGA	502		20.52	BAJO

NO.	FECHA	NOMFIN	PANTE	DIV	%VWC	NIVEL
131	15/02/2019	COVADONGA	503		26.15	BAJO
132	2/05/2019	LA MAQUINA	311		36.28	OPTIMO
133	2/05/2019	LA MAQUINA	312		30.95	BUENO
134	2/05/2019	COSTA RICA	14		41.00	BUENO
135	2/05/2019	VERSALLES	2		31.60	REGULAR
136	2/05/2019	VERSALLES	10		31.10	BAJO
137	2/05/2019	VERSALLES	15		37.03	REGULAR
138	3/05/2019	LA MAQUINA	203		35.97	OPTIMO
139	3/05/2019	LA MAQUINA	204		36.43	OPTIMO
140	3/05/2019	LA MAQUINA	206		40.05	OPTIMO
141	3/05/2019	LA MAQUINA	210		39.63	OPTIMO
142	8/05/2019	COVADONGA	200		32.83	OPTIMO
143	8/05/2019	COVADONGA	1000		42.30	OPTIMO
144	8/05/2019	COVADONGA	202		35.20	OPTIMO
145	8/05/2019	COVADONGA	203		41.03	OPTIMO
146	8/05/2019	COVADONGA	204		36.72	OPTIMO
147	8/05/2019	COVADONGA	205		40.36	OPTIMO
148	8/05/2019	COVADONGA	206		41.80	OPTIMO
149	8/05/2019	COVADONGA	207		40.75	OPTIMO
150	8/05/2019	COVADONGA	208		41.50	OPTIMO
151	8/05/2019	COVADONGA	209		39.50	OPTIMO
152	8/05/2019	COVADONGA	1002		42.60	OPTIMO
153	9/05/2019	LA MAQUINA	415		30.03	OPTIMO
154	9/05/2019	LOS AGUACATES	308		36.73	OPTIMO
155	9/05/2019	LOS AGUACATES	309		32.42	OPTIMO
156	9/05/2019	COVADONGA	408		28.68	OPTIMO
157	9/05/2019	COVADONGA	409		31.70	OPTIMO
158	10/05/2019	NUEVE CERROS	101		30.85	REGULAR
159	10/05/2019	NUEVE CERROS	102		31.10	REGULAR
160	10/05/2019	NUEVE CERROS	103		35.20	OPTIMO

Continuación cuadro 55...

NO.	FECHA	NOMFIN	PANTE	DIV	%VWC	NIVEL
161	10/05/2019	NUEVE CERROS	104		32.20	REGULAR
162	10/05/2019	NUEVE CERROS	105		35.53	BUENO
163	10/05/2019	LA MAQUINA	404		32.08	BUENO
164	10/05/2019	LA MAQUINA	405		31.55	BUENO
165	10/05/2019	LA MAQUINA	406		28.75	BUENO
166	10/05/2019	LA MAQUINA	409		30.70	OPTIMO
167	10/05/2019	LA MAQUINA	510		32.48	OPTIMO
168	10/05/2019	LOS AGUACATES	107	B	30.36	OPTIMO
169	10/05/2019	LOS AGUACATES	202	A	27.10	REGULAR
170	10/05/2019	COVADONGA	407		29.35	BUENO
171	10/05/2019	COVADONGA	410		36.33	BUENO
172	10/05/2019	COVADONGA	411		34.58	BUENO
173	11/05/2019	LA MAQUINA	418		27.11	BUENO
174	14/05/2019	LA MAQUINA	214		30.30	OPTIMO
175	14/05/2019	LA MAQUINA	411		32.03	OPTIMO
176	14/05/2019	COSTA RICA	9		29.53	BAJO
177	28/06/2019	COVADONGA	101		30.40	OPTIMO
178	28/06/2019	COVADONGA	204		26.32	BUENO
179	28/06/2019	COVADONGA	208		26.48	OPTIMO
180	28/06/2019	COVADONGA	401		29.13	OPTIMO
181	2/07/2019	NUEVE CERROS	405		31.08	OPTIMO
182	2/07/2019	LA MAQUINA	108		27.23	BUENO
183	2/07/2019	LA MAQUINA	111		29.30	OPTIMO
184	2/07/2019	LA MAQUINA	513		32.76	OPTIMO
186	3/07/2019	LA MAQUINA	707		29.56	REGULAR
187	3/07/2019	COVADONGA	100		26.85	OPTIMO
188	3/07/2019	COVADONGA	102		26.96	OPTIMO
189	3/07/2019	COVADONGA	105		15.30	BAJO
190	3/07/2019	COVADONGA	209		30.63	OPTIMO
191	3/07/2019	COVADONGA	210		23.41	BUENO
192	5/07/2019	COVADONGA	300		27.84	OPTIMO
193	5/07/2019	COVADONGA	201		30.05	OPTIMO
194	5/07/2019	COVADONGA	401		27.00	OPTIMO
195	19/07/2019	COVADONGA	800		31.77	OPTIMO
196	19/07/2019	COVADONGA	900		33.12	OPTIMO
197	19/07/2019	COVADONGA	701		32.63	OPTIMO
198	19/07/2019	COVADONGA	702		33.98	OPTIMO
199	19/07/2019	COVADONGA	902		34.50	OPTIMO
200	24/07/2019	COVADONGA	104		26.48	OPTIMO
201	24/07/2019	COVADONGA	203		29.68	OPTIMO
202	24/07/2019	COVADONGA	403		26.93	OPTIMO
203	24/07/2019	COVADONGA	411		31.46	REGULAR
204	1/08/2019	NUEVE CERROS	102		34.18	BUENO
205	1/08/2019	NUEVE CERROS	104		30.88	REGULAR
206	1/08/2019	NUEVE CERROS	203		34.93	OPTIMO
207	2/08/2019	LOS AGUACATES	102		33.00	OPTIMO
208	2/08/2019	COVADONGA	408		27.90	OPTIMO
209	2/08/2019	COVADONGA	410		25.53	BAJO

En el cuadro 55 se observa el contenido de humedad determinado a partir del uso de la sonda TDR. En total se monitoreó 209 lotes de producción a lo largo de la temporada de zafra 2018-19. Los contenidos de humedad observados fueron clasificados en 4 categorías “OPTIMO”, “BUENO”, “REGULAR” y “BAJO”. La columna %VWC hizo referencia al contenido volumétrico del agua y comparando dicho contenido con las constantes de humedad del suelo como Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente, se le asignó las categorías mencionadas.

b. Presentación de la cantidad de área monitoreada durante la zafra 2018-19

En el cuadro 56 se muestra la cantidad de área monitoreada semanalmente en la ejecución del servicio.

Cuadro 56. Área monitoreada (en hectáreas) semanalmente durante la temporada de zafra 2018-19

AÑO/SEMANA	AREA (ha)
2018	509.68
40	67.34
46	119.54
47	31.93
49	108.16
51	182.71
2019	2280.8
3	355.34
5	322.11
7	561.84
18	107.85
19	377.44
20	41.51
26	80.84
27	169.49
29	128.3
30	64.63
31	71.45
Total	2790.48

En el cuadro 56 se observa la cantidad de área monitoreada durante la temporada de zafra que fueron 2,790.48 ha. Considerando que el área total de la Región VII es de

3,941 ha. Se podría asumir que la región fue cubierta hasta en un 70.80%. Así mismo se observa que la distribución de las hectáreas monitoreadas de acuerdo a la semana en curso, resaltando el resultado de 561.84 ha monitoreadas en la semana 7 del año 2019; dicho resultado fue posible por la extensión de los lotes monitoreados durante esa semana.

Cuadro 57. Áreas monitoreadas de acuerdo a su nivel de humedad.

NIVEL DE HUMEDAD	AREA (ha)
BAJO	714.27
BUENO	490.43
OPTIMO	1179.05
REGULAR	406.73
TOTAL	2790.48

En el cuadro 57 se observa que debido al uso de la sonda fue posible determinar un total de 714 ha bajo estrés hídrico, es decir la humedad se encontraba igual o por debajo del déficit permitido de manejo. Así mismo fueron detectadas 406.73 ha con un nivel de humedad regular, que indicó que el suelo estaba a punto de entrar en déficit por lo tanto requerir riego. También se detectaron 1179.05 ha que estaban con un contenido de humedad ideal para el óptimo desarrollo del cultivo, ya que esto hace referencia a la capacidad de campo. Por todo lo anterior esta información fue importante para la decisión de regar en la región VII del Ingenio Santa Ana. La prioridad de la aplicación del riego fue dada a los lotes donde el TDR marcó bajo, es decir las 714.27 ha.

En el cuadro 58 se muestra la cantidad de pantes monitoreados según semana durante la zafra 2018-19.

Cuadro 58. Número de pantes (lotes de producción) monitoreadas semanalmente durante la temporada de zafra 2018-19.

AÑO/SEMANA	NO. PANTES MONITOREADOS
2018	38
40	5
46	12
47	3
49	5
51	13
2019	171
3	30
5	31
7	32
18	10
19	32
20	3
26	4
27	14
29	5
30	4
31	6
Total general	209

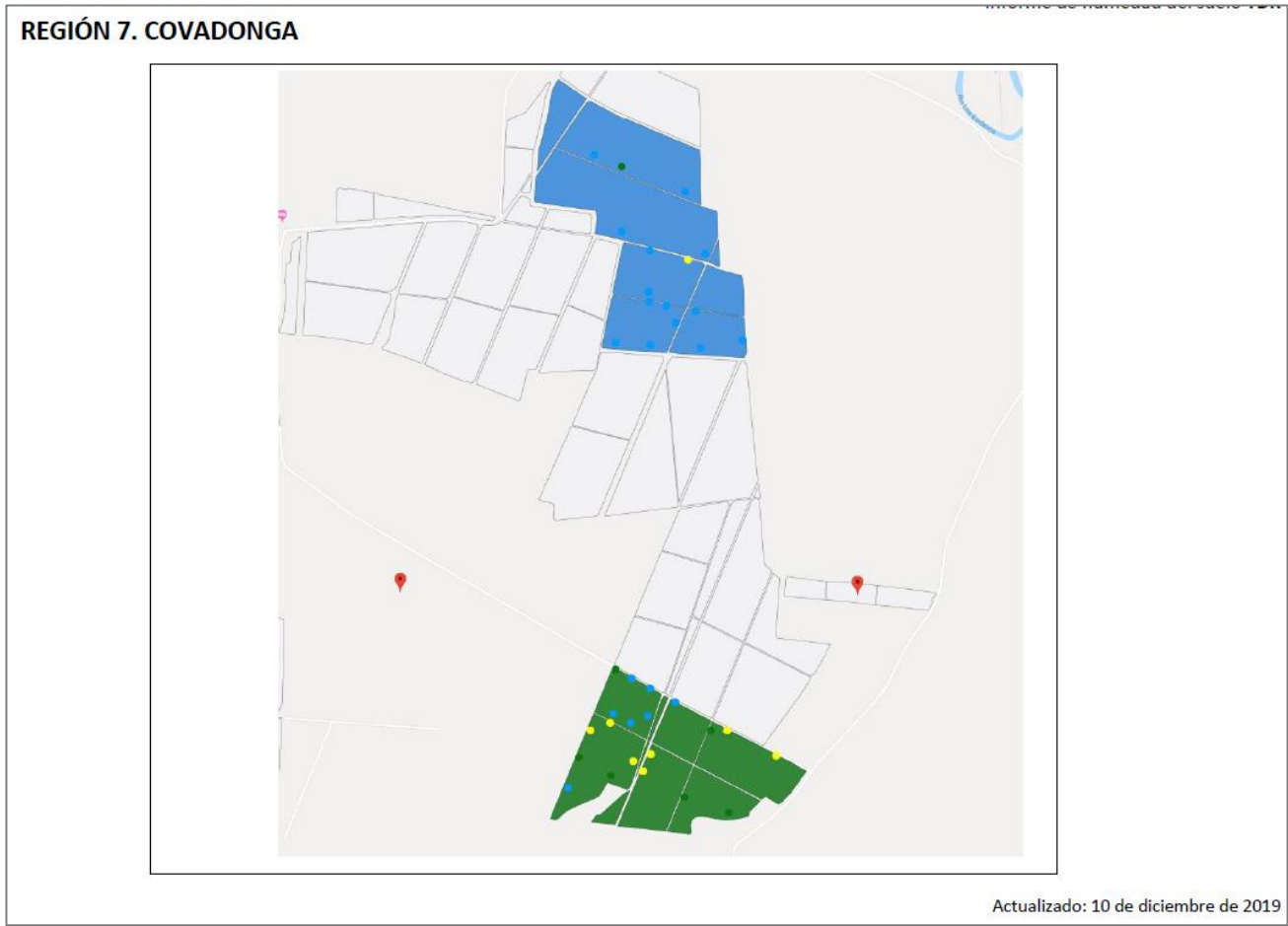
Finalmente, en el cuadro 58 se observa la distribución de lotes monitoreados semanalmente. Siendo en la semana 20 del año 2019 donde únicamente se monitoreó 3 pantes, esto debido a la disponibilidad del equipo en ese momento. Así mismo en las semanas 3, 5, 7, y 19 del año 2019, se monitoreados 30, 31, 32 y 32 lotes respectivamente debido a la disponibilidad del equipo y apoyo del personal de campo.

E. Evaluación

- a.** Se determinó el contenido de humedad del suelo utilizando la sonda TDR, presentando resultados de tipo óptimo, bueno, regular y bajo en la región VII. Dichos resultados sirvieron de apoyo para la toma de decisiones de regar o no regar, siendo esta positiva cuando el monitoreo según TDR indicó una humedad regular y baja.

- b.** La cantidad de área monitoreada total en la región VII durante la zafra 2018-19 fue de 2790.48 ha. Para el año 2018 se monitorearon 509.68 ha y para el año 2019 un total de 2280.8 ha. Del total de área monitoreada, 714.27 ha se monitorearon y el TDR indicó una humedad baja, 490.43 ha el TDR indicó una humedad buena, 1,179.05 ha de área fueron óptimas y 406.73 ha fueron de humedad regular. En total 1,121 ha de la suma de humedad regular y baja se reportaron con necesidades de riego siendo el 40 % del total de área monitoreada.

F. Medios de verificación



Fuente: elaboración propia, 2019.

Figura 61. Constancia del monitoreo de humedad con sonda TDR.



Fuente: elaboración propia, 2019.

Figura 62. Monitoreo de la humedad con tdr.



Fuente: elaboración propia 2019.

Figura 63. Comprobación al tacto durante el monitoreo de humedad con tdr.

4.5 BIBLIOGRAFIA

1. Barneond Ázurdia, Julio. (2011). *Análisis del riego por aspersión en caña de azúcar con fines de mejoras técnicas y económicas*. Tesis Lic. Guatemala, Guatemala, USAC. 154 p.
2. Basso, C; Murillo, J; Trujillo, A. (2008). Evaluación de un equipo de reflectometría de dominio temporal (TDR) para registros de humedad en un suelo franco. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 25:3-16
3. Camejo Barreiro, L; Duarte Naranjo, L. Guerra Hernández, G. (2017). Diseño agronómico en máquinas de pivote central, rendimientos, ahorro de agua y energía. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 38(2):3-16.
4. Ceballos Barbancho, A; Martínez Fernández, J. (2001). *Diseño y validación de una sonda TDR para la medición de la humedad del suelo*. Salamanca, España, Universidad de Salamanca. 7 p.
5. Largaespada, Kenneth; Henríquez, Carlos. (2015). Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo. *Agronomía Costarricense*. 39(3):137-147.
6. Vásquez, A; Vásquez, I; Vásquez, C; Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de Ingeniería de Riegos*. 1ed. Lima, Perú, Universidad Agraria La Molina. 442 p.





Ref. SAIEPSA.09.1.2022

Guatemala, 11 de marzo de 2022

TRABAJO DE GRADUACIÓN:

EVALUACIÓN DE UNIFORMIDAD DE RIEGO DEL PIVOTE CENTRAL DE LA FINCA LA MÁQUINA, CHIQUIMULILLA, SANTA ROSA, EN CAÑA DE AZÚCAR Y SU MEJORAMIENTO MEDIANTE EL REDISEÑO DE LA CARTILLA DE ASPERSIÓN, DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS REALIZADOS PARA EL INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.

ESTUDIANTE:

JOSÉ ASDRUBAL TUCH MÉNDEZ

No. CARNÉ

201408004

Dentro del Trabajo de Graduación se presenta el Capítulo II que se refiere a la Investigación Titulada:

“EVALUACIÓN DE UNIFORMIDAD DE RIEGO DEL PIVOTE CENTRAL DE LA FINCA LA MÁQUINA, CHIQUIMULILLA, SANTA ROSA, EN CAÑA DE AZÚCAR Y SU MEJORAMIENTO MEDIANTE EL REDISEÑO DE LA CARTILLA DE ASPERSIÓN, GUATEMALA, C.A.”

LA CUAL HA SIDO EVALUADA POR LOS PROFESIONALES: Dr. Byron González

Ing. Agr. David Juárez Quim

Dr. Marco Vinicio Fernández Montoya

Los Asesores de Investigación, Docente Asesor de EPSA y la Coordinación del Área Integrada, hacen constar que ha cumplido con las normas universitarias y Reglamento de la Facultad de Agronomía. En tal sentido, pase a Decanatura.

“Id y Enseñad a Todos”

Vo. Bo. Ing. Agr. M.A. Pedro Peláez Reyes
Coordinador Área Integrada – EPS





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA-FAUSAC-
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS
Y AMBIENTALES -IIA-



REF. Sem. 68/2021

EL TRABAJO DE GRADUACIÓN TITULADO:

"EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE
RIEGO DEL PIVOTE CENTRAL DE LA FINCA
LA MÁQUINA, CHIQUIMULILLA, SANTA
ROSA, EN CAÑA DE AZÚCAR Y SU
MEJORAMIENTO MEDIANTE EL REDISEÑO
DE LA CARTILLA DE ASPERSIÓN,
GUATEMALA, C.A."

DESARROLLADO POR EL ESTUDIANTE:

JOSÉ ASDRÚBAL TUCH MÉNDEZ

CARNÉ:

201408004

HA SIDO EVALUADO POR LOS PROFESIONALES:

Dr. Byron González
Ing. Agr. David Juárez Quim
Dr. Marco Vinicio Fernández Montoya

Los Asesores y la Dirección del Instituto de Investigaciones Agronómicas y Ambientales de la Facultad de Agronomía, hace constar que ha cumplido con las Normas Universitarias y el Reglamento de este Instituto. En tal sentido pase a la Dirección del Área Integrada para lo procedente.

Ing. Agr. David Juárez Quim
ASESOR ESPECÍFICO

Dr. Marco Vinicio Fernández Montoya
DOCENTE- ASESORES

Ing. Agr. Carlos Fernando López Búcaro
DIRECTOR DEL IIA



CFLB/nm
c.c. Archivo



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
Acreditada Internacionalmente



Trabajo de Graduación:

**“EVALUACIÓN DE UNIFORMIDAD DE RIEGO DEL
PIVOTE CENTRAL DE LA FINCA LA MÁQUINA,
CHIQUMULILLA, SANTA ROSA, EN CAÑA DE AZÚCAR Y SU
MEJORAMIENTO MEDIANTE EL REDISEÑO DE LA CARTILLA
DE ASPERSIÓN, DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS REALIZADOS
PARA EL INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA,
GUATEMALA, C.A.”**

Estudiante:

José Asdrubal Tuch Méndez

Carné:

201408004

“IMPRÍMASE”

Ing. Agr. Waldemar Nufio Reyes
DECANO

