

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ÁREA INTEGRADA



TRABAJO DE GRADUACIÓN

EVALUACIÓN SEMI COMERCIAL DEL EFECTO DE DOS PROGRAMACIONES DE RIEGO POR ASPERSIÓN TIPO CAÑÓN, SOBRE EL RENDIMIENTO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum spp.*) EN PLANTÍA, EN TRES LOCALIDADES; DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS REALIZADOS EN EL INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.

MANUEL EDGARDO QUIÑÓNEZ MONTEJO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ÁREA INTEGRADA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**EVALUACIÓN SEMI COMERCIAL DEL EFECTO DE DOS PROGRAMACIONES DE
RIEGO POR ASPERSIÓN TIPO CAÑÓN, SOBRE EL RENDIMIENTO DE LA CAÑA DE
AZÚCAR (*Saccharum* spp.) EN PLANTÍA, EN TRES LOCALIDADES;
DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS REALIZADOS EN 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
MANUEL EDGARDO QUIÑÓNEZ MONTEJO**

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

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

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RECTOR

Ing. M.Sc. Murphy Olympto Paiz Recinos

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA

DECANO	Ing. Agr. Mario Antonio Godínez López
SECRETARIO	Ing. Agr. Juan Alberto Herrera Ardón
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	P. Agr. Marlon Estuardo González Álvarez
VOCAL V	P. Agr. Marvin Orlando Sicajaú Pec

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

Guatemala, 24 de septiembre de 2019

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

Honorables miembros:

De conformidad con las normas establecidas en la ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a su consideración, el trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN SEMI COMERCIAL DEL EFECTO DE DOS PROGRAMACIONES DE RIEGO POR ASPERSIÓN TIPO CAÑÓN, SOBRE EL RENDIMIENTO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum spp.*) EN PLANTÍA, EN TRES LOCALIDADES; DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS REALIZADOS EN INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.** como requisito previo a optar el 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”

MANUEL EDGARDO QUIÑÓNEZ MONTEJO

ACTO QUE DEDICO

A DIOS:

Quien inspiró mi espíritu para la realización de este estudio, por darme salud y para alcanzar mis metas como persona y como profesional.

A MIS PADRES:

Guadalupe Quiñónez Felipe

Por guiarme y ensañarme que no son los tropiezos y caídas los que te definen como persona, si no las veces que te levantas, miras hacia adelante y sigues caminando.

Petrona Montejo Méndez

Por tu amor incondicional, tus cuidados, tus consejos y sobre todo por la luz de tus oraciones que me acompañan siempre.

A los dos, gracias por su esfuerzo y sacrificio, por su amor y por enseñarme que la fuerza más poderosa del universo es el amor de la familia.

A MIS HERMANOS:

Jesús Alfredo Quiñónez Montejo

Por tu amistad, tu cariño y apoyo incondicional, porque cada vez que necesité de un amigo estuviste allí, de un psicólogo y allí estabas, de un doctor y seguías allí... Chus le agradezco a la vida por darme un hermano con el corazón tan grande como el tuyo, en quien confiar, en quien buscar apoyo, paz y sobre todo amistad. Porque sin importar que tan complejo se pongan las cosas, sé que encuentro refugio en tu cariño y comprensión. *¡Un hombre extraordinario!*

Trinidad Floridalma Quiñónez Montejo

Por ti y tu forma única de demostrarle cariño a la familia, por ser un alma libre, capaz de nadar contra corriente por perseguir sus sueños y motivaciones, apasionada, centrada, dedicada y disciplinada, siempre serás nuestra princesa.

A MIS ABUELOS:

Trinidad Rojas Felipe, Manuel Quiñónez Rojas (Q.E.P.D.), Candelaria Méndez, Jesús Montejo Silvestre (Q.E.P.D.) gracias por el apoyo, sus consejos y sobre todo su amor y comprensión en momentos difíciles.

A MI NOVIA:

Por tus palabras de aliento, tu comprensión, tus oraciones, tus cuidados, tu amor, tu apoyo incondicional y por ser el pilar del cual sostenerme en esta la última etapa de mi carrera, estoy encantado de compartir este logro contigo.

A MIS AMIGOS:

Por brindarme su apoyo y amistad a lo largo de la carrera y por los grandes momentos compartidos especialmente: Alex Sosa Yupe, Moisés Carías Donis (Solanum, Orquidium y el InvernaGym nos esperan), Juan Francisco Pec Hernández, Willy Tut Si (Grandes amigos y compañeros de casa), Kenneth Loarca, Guillermo López (los primeros amigos que me dio la FAUSAC), Fredy Marroquín, Angelita Montejo y Wendy Sierra. *¡Gracias por hacer del viaje la recompensa!*

A MIS CATEDRÁTICOS:

Por ser más que un libro abierto, y porque aún fuera de las aulas me compartieron su sabiduría, consejos y apoyo. Por compartir mis motivaciones y pasiones. Por incentivar me a ser mejor cada día. Especialmente: Ing. Waldemar Nufio, PhD. Hugo Cardona, Ing. Byron González, Ing. Byron Zuñiga y demás catedráticos, gracias por dedicar su vida a la educación. Gracias por enseñarme que la vida es más que ingeniería y ciencia, también está el arte.

TRABAJO DE GRADUACIÓN QUE DEDICO

A DIOS:

Por permitirme culminar mi carrera, por guiar mis pasos, por darme fuerzas para alcanzar mis metas, sueños y anhelos.

A MI FAMILIA:

Por este triunfo, porque sin ellos no habría podido culminarlo.

A MI PATRIA GUATEMALA:

País de la eterna primavera, que este éxito sirva para poder contribuir a tu desarrollo y a todo el pueblo de Guatemala que gracias a sus impuestos se sustenta la educación superior en la Tricentenario.

A LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA:

Por abrirme las puertas y ser mi casa de estudios, que me alimentó de conocimientos y contribuyó a mi desarrollo ético y profesional.

A LA FAUSAC

Casa de estudios del área agrícola, formadora de ingenieros agrónomos de éxitos, dispuestos a luchar por el desarrollo integral del país. Gracias por hacerme un profesional de bien.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS NUESTRO CREADOR:

Gracias por haberme dado una excelente familia, por permitirme conocer excelentes profesores, amigos y compañeros de estudio que me han motivado y apoyado para alcanzar esta meta.

A MIS PADRES:

Por el esfuerzo que realizan por darme la oportunidad de completar mis estudios, por todo su sacrificio, su apoyo moral, espiritual y económico sin importar condiciones.

A MIS ABUELAS:

Gracias por sus consejos.

MIS ASESORES:

Ing. Agr. David Juárez por su asesoría, correcciones y consejos para la elaboración de la investigación.

Ing. Agr. Otto Castro por su asesoría y el seguimiento dado durante el desarrollo de la investigación.

Ing. Agr. Héctor Monterroso por su constante supervisión y asesoría en el presente trabajo de graduación y por su amistad.

Ing. Agr. Marco Palala por la asesoría y consejos para la elaboración de la investigación, además de su apoyo y amistad.

GRUPO CORPORATIVO SANTA ANA:

Por permitirme culminar mi vida como estudiante y darme la bienvenida a la vida profesional y permitirme ser parte de tan prestigiosa empresa.

COMPAÑEROS Y AMIGOS DEL GRUPO CORPORATIVO SANTA ANA:

Gracias por la asesoría, la amistad y los buenos consejos que permitieron iniciar mi vida profesional con buenos pasos, en especial a: Ing. Fernando Itzep, Ing. Marvin Pec.

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA:

Por ser un excelente equipo de trabajo y compartir conmigo desde el primer día sus conocimientos, experiencias e historias, en especial a: Ing. Marco Palala (por demostrar que es más divertido hacerse pirata que unirse a la marina), Fredy Marroquín, David Meléndez, Hernán Revolorio, Rony Flores, Luis Lima, los hermanos Chamale y Miliven Barrera gracias a todos por permitirme ser parte de la familia y apoyarme en todo para llevar a cabo esta investigación. *¡Son un éxito!*

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
RESUMEN	xv
CAPÍTULO I DIAGNÓSTICO DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA, GRUPO CORPORATIVO SANTA ANA, ESCUINTLA, GUATEMALA.....	1
1.1 PRESENTACIÓN	3
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 METODOLOGÍA.....	5
1.3.1 Recopilación de información.....	5
A. Información Primaria.....	5
B. Información Secundaria	5
1.3.2 Recursos utilizados.....	5
1.3.3 Sistematización de datos	5
1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	6
1.4.1 Ubicación geográfica del Ingenio Santa Ana	6
1.4.2 Vías de acceso	6
1.4.3 Condiciones climáticas	9
A. Red meteorológica.....	9
B. Red pluviométrica	10
1.4.4 Actividades del ingenio	10
A. Mercado interno.....	11
B. Mercado de Exportación.....	11
1.4.5 Composición social y económica.....	11
1.4.6 Estructura Organizativa del grupo corporativo.....	11
A. Misión	11
B. Visión	12
C. Valores.....	12
D. Estructura organizacional	12

	PÁGINA
1.4.7 Estructura organizacional del Departamento de Ingeniería Agrícola.....	14
1.4.8 Cargos y responsabilidades dentro del departamento	14
A. Área de riegos	14
B. Área de ingeniería civil y riesgos.....	15
C. Área de diseño agrícola y topografía.....	15
1.4.9 Situación actual del departamento	16
A. Área de riegos	16
B. Área de ingeniería civil y riesgos.....	17
C. Área de diseño agrícola y topografía.....	17
1.4.10 Matriz de priorización de problemas	19
1.5 CONCLUSIONES	21
1.6 BIBLIOGRAFÍA.....	22
CAPÍTULO II EVALUACIÓN SEMI COMERCIAL DEL EFECTO DE DOS	
PROGRAMACIONES DE RIEGO POR ASPERSIÓN TIPO CAÑÓN SOBRE EL	
RENDIMIENTO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum spp.</i>) EN PLANTÍA, EN	
TRES LOCALIDADES, INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C. A.	
23	
2.1 PRESENTACIÓN.....	25
2.2 MARCO TEÓRICO	27
2.2.1 Marco Conceptual	27
A. Importancia económica de la caña de azúcar	27
B. Riego en la caña de azúcar.....	27
C. Balance Hídrico	29
D. Sondas FDR para monitoreo de humedad	52
2.2.2 Marco Referencial	56
A. Ubicación geográfica de localidades	56
B. Influencia de estaciones meteorológicas del ICC sobre localidades	57
C. Localidad 1: Agrícola del Sur.....	58
D. Localidad 2: La Prosperidad.....	60
E. Localidad 3: California.....	63
2.3 OBJETIVOS.....	65

	PÁGINA
2.3.1	Objetivo General..... 65
2.3.2	Objetivos Específicos 65
2.4	HIPÓTESIS 65
2.5	METODOLOGÍA..... 66
2.5.1	Descripción de tratamientos 66
A.	Tratamiento 1: Testigo relativo 66
B.	Tratamiento 2: Balance hídrico 66
C.	Distribución de unidades experimentales 67
2.5.2	Manejo del experimento 71
A.	Selección de lotes..... 72
B.	Muestreo de suelos 72
C.	Manejo de las programaciones de riego 73
D.	Riego de establecimiento 79
E.	Instalación de sondas FDR..... 79
F.	Instalación de tubos piezométricos 83
G.	Medición de sondas FDR y tubos piezométricos 84
H.	Evaluación de uniformidad de riego..... 85
I.	Monitoreo de indicadores de crecimiento 89
J.	Medición de variables respuesta 91
2.5.3	Análisis de información 92
A.	Seguimiento de los indicadores de crecimiento..... 92
B.	Producción de caña y azúcar por hectárea 92
C.	Análisis económico 93
2.6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN 94
2.6.1	Cultivo..... 94
2.6.2	Suelo 95
2.6.3	Dinámica de la humedad en el suelo 97
A.	Agrícola del Sur 98
B.	La Prosperidad 99
C.	California 100

	PÁGINA
D. Comportamiento de la evapotranspiración	102
2.6.4 Validación del balance hídrico con sondas FDR	103
2.6.5 Variables biométricas	106
A. Agrícola del Sur	106
B. La Prosperidad	108
C. California	109
D. Efecto de las programaciones de riego sobre las características biométricas de la caña	111
2.6.6 Producción de caña y azúcar	115
A. Agrícola del Sur	116
B. La Prosperidad	116
C. California	117
2.6.7 Análisis económico.....	118
A. Agrícola del Sur.....	119
B. La Prosperidad	120
C. California	121
2.7 CONCLUSIONES	122
2.8 RECOMENDACIONES.....	125
2.9 BIBLIOGRAFÍA.....	127
2.10 APÉNDICES	134
CAPÍTULO III INFORME DE SERVICIOS PRESTADOS AL DEPARTAMENTO DE	
INGENIERÍA AGRÍCOLA, INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.....	
3.1 PRESENTACIÓN.....	159
3.2 SERVICIO I. MONITOREO DE LA HUMEDAD DEL SUELO USANDO SONDAS DE CAPACITANCIA TIPO FDR EN ÁREAS CRÍTICAS DEL INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.....	160
3.2.1 Definición del problema	160
3.2.2 Objetivos	160
A. Objetivo General	160
B. Objetivos Específicos	160

	PÁGINA
3.2.3 Metodología	160
A. Selección de puntos de medición	160
B. Instalación de tubos.....	161
C. Medición de humedad	162
D. Almacenamiento y actualización de datos.....	163
E. Interpretación de resultados y generación de informes	164
3.2.4 Evaluación	167
3.2.5 Constancias.....	168
3.3 SERVICIO II. EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO POR ASPERSIÓN EN FINCAS DEL INGENIO SANTA ANA.....	171
3.3.1 Definición del problema	171
3.3.2 Objetivos.....	171
A. Objetivo General.....	171
B. Objetivos Específicos	171
3.3.3 Metodología	172
A. Selección del punto de evaluación	172
B. Recopilación de información.....	172
C. Instalación de recipientes recolectores.....	174
D. Medición de pluviometría	175
E. Coeficiente de uniformidad (C.U.).....	176
F. Uniformidad de distribución.....	176
3.3.4 Evaluación	176
3.3.5 Constancias.....	179
3.4 BIBLIOGRAFÍA	184

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 1. Fotografía aérea del Ingenio Santa Ana, marzo 2016.....	6
Figura 2. Mapa general de fincas y rutas cañeras utilizadas por Grupo Corporativo Santa Ana (noviembre, 2016)	8
Figura 3. Ubicación de estaciones meteorológicas administradas por la Agroindustria Azucarera de Guatemala	9
Figura 4. Distribución de pluviómetros dentro de las fincas del Ingenio Santa Ana, Zafra 2015-2016.....	10
Figura 5. Organigrama general del Grupo Corporativo Santa Ana	12
Figura 6. Organigrama del Departamento de Ingeniería Agrícola, Ingenio Santa Ana.....	14
Figura 7. Red de bancos de marca geodésicas dentro del Ingenio Santa Ana Zafra 2015/2016	18
Figura 8. Valor FOB, en millones de US\$, de la exportación de azúcar de Guatemala de 1994 a 2015	27
Figura 9. Balance de agua en la zona radicular, entradas y salidas de agua en el suelo	30
Figura 10. Ciclo fenológico y productivo de la caña de azúcar en el hemisferio norte.....	33
Figura 11. Dinámica de la población y altura de caña en función de la edad en meses	34
Figura 12. Tasa de crecimiento en cm/día, Ingenio El Baúl, 1996	34
Figura 13. Etapas fenológicas de la caña de azúcar en condiciones del área lisimétrica de estación experimental CENGICAÑA, 1997	35
Figura 14. Curva generalizada de coeficiente de cultivo K_c	36
Figura 15. Planta de caña joven mostrando las dos clases de raíces: primordiales y permanentes	38
Figura 16. Esquema de distribución del agua en un sistema de riego por aspersión	41
Figura 17. Distribución de recipientes recolectores durante una prueba de uniformidad de riego en el sistema de riego por aspersión	41
Figura 18. Diseño e instalación de tubo piezométrico en campo	44

PÁGINA

Figura 19. Relación lluvia e infiltración para determinación de tiempo de encharcamiento	45
Figura 20. Evaporación y transpiración durante el desarrollo del cultivo	47
Figura 21. Representación típica de la variación de índice de Área Foliar (IAF) a lo largo del periodo de crecimiento de un cultivo de maíz	50
Figura 22. Componentes de la sonda de capacitancia FDR de Sentek®	54
Figura 23. Ubicación geográfica de localidades estudiadas	56
Figura 24. Influencia de las estaciones meteorológicas del ICC sobre las localidades evaluadas	57
Figura 25. Ubicación del lote 521 de finca Agrícola del Sur	58
Figura 26. Precipitación anual en finca Agrícola del Sur	58
Figura 27. Velocidades de viento (en km/h) registradas en la estación Costa Brava en fecha 9 de febrero de 2016.	59
Figura 28. Calicata realizada en finca Agrícola del Sur	60
Figura 29. Ubicación del lote 14, finca La Prosperidad	60
Figura 30. Precipitación anual en finca La Prosperidad	61
Figura 31. Velocidades de viento (en km/h) registradas en la estación Amazonas, en fecha 10 de febrero de 2016.	62
Figura 32. Calicata realizada en finca La Prosperidad	62
Figura 33. Lote 221A de finca California	63
Figura 34. Precipitación anual en finca California	63
Figura 35. Calicata realizada en finca California	64
Figura 36. Diseño de bordes entre unidades experimentales	67
Figura 37. Distribución de tratamientos dentro del lote 521, de finca Agrícola del Sur	68
Figura 38. Distribución de tratamientos dentro de lote 14, finca La Prosperidad	69
Figura 39. Distribución de tratamientos dentro de lote 221A, finca California	70
Figura 40. Resumen diagramático de metodología seguida durante investigación	71
Figura 41. Diagrama de desarrollo de muestreo de suelo por lote y muestra lista para llevar a laboratorio	72

Figura 42. Pantalla de registro de características físicas del suelo en el balance hídrico	74
Figura 43. Pantalla de registro de características fenológicas del cultivo	75
Figura 44. Pantalla de registro de información meteorológica de la localidad	76
Figura 45. Gráfico utilizado para el monitoreo de la humedad en el suelo	77
Figura 46. Pantalla de registro de lámina de riego aplicada por evento	79
Figura 47. Diagrama de proceso de instalación del tubo de acceso para la medición de humedad con sondas FDR.....	80
Figura 48. Relación del contenido volumétrico de agua y la escala de frecuencia medida por la sonda FDR	81
Figura 49. Ubicación de mediciones para la calibración de la sonda FDR	82
Figura 50. Proceso de instalación de tubos piezométricos en campo	83
Figura 51. Medición de puntos de muestreo con sondas FDR en campo.....	84
Figura 52. Medición de tubo piezométrico en campo.....	85
Figura 53. Distribución de recipientes recolectores en campo para prueba de uniformidad de riego	85
Figura 54. Boleta de campo utilizado para el registro de información de la prueba de uniformidad de riego	86
Figura 55. Distribución de recipientes recolectores con 4 aspersores operando	87
Figura 56. Distribución de puntos de medición por unidad experimental.....	89
Figura 57. Identificación de plantas medición de altura y longitud de entrenudos	89
Figura 58. Ubicación de lígula en hoja de caña de azúcar	90
Figura 59. Medición de longitud de entrenudo según la altura de la caña	91
Figura 60. Duración de etapa fenológica y K_c del cultivo propuesto por Juárez y Muñóz	97
Figura 61. Dinámica de la capa freática dentro del lote 221A de finca California	102
Figura 62. Diagrama de dispersión de datos del contenido de humedad estimado con balance hídrico vs FDR.....	105
Figura 63. Población por metro lineal en el testigo relativo y el tratamiento con balance hídrico de finca Agrícola del Sur	106

PÁGINA

Figura 64. Altura de caña en el testigo relativo y tratamiento con balance hídrico de finca Agrícola del Sur.....	107
Figura 65. Longitud de entrenudos en el testigo relativo y tratamiento con balance hídrico de finca Agrícola del Sur.....	107
Figura 66. Población por metro lineal en testigo relativo y tratamiento con balance hídrico en finca La Prosperidad.....	108
Figura 67. Dinámica de la altura en el tratamiento 1: testigo relativo y tratamiento 2: balance hídrico de la localidad dos.....	108
Figura 68. Longitud de entrenudos en el testigo relativo y tratamiento con balance hídrico dentro de finca La Prosperidad.....	109
Figura 69. Abatimiento de caña por vientos en finca California.....	109
Figura 70. Población de caña por metro lineal en el testigo relativo y tratamiento con balance hídrico en finca California.....	110
Figura 71. Altura de la caña en el testigo relativo y tratamiento con balance hídrico de finca California.....	110
Figura 72. Longitud de entrenudos en el testigo relativo y tratamiento con balance hídrico de finca California.....	111
Figura 73. Altura y tasa de crecimiento de la caña en el tratamiento con balance hídrico de finca Agrícola del Sur.....	112
Figura 74. Tasa de crecimiento de la caña en cm/día, Ingenio El Baúl, 1996.....	113
Figura 75. Tasa de crecimiento de la caña en cm/día, ensayo de tres láminas de riego en finca El Jabalí, Ingenio Tierra Buena, 1996.....	113
Figura 76. Altura y tasa de crecimiento de la caña en el tratamiento con balance hídrico de finca La Prosperidad.....	114
Figura 77. Tasa de crecimiento de la caña en cm/día, en finca Playa Grande, 1996.....	114
Figura 78A. Distribución de tubos piezométricos en la primera localidad de la Investigación ubicada en el lote 521 de la finca Agrícola del Sur.....	134
Figura 79A. Distribución de tubos piezométricos en la segunda localidad de la Investigación ubicada en el lote 14 de la finca La Prosperidad.....	135

Figura 80A. Distribución de tubos piezométricos en la tercera localidad de la Investigación ubicada en el lote 221A de la finca California.....	136
Figura 81A. Ubicación de puntos de medición de humedad con sonda FDR en unidades experimentales de la localidad uno, finca Agrícola del Sur.....	137
Figura 82A. Ubicación de puntos de medición de humedad con sonda FDR en unidades experimentales de la localidad dos, finca La Prosperidad	138
Figura 83A. Ubicación de puntos de medición de humedad con sonda FDR en unidades experimentales de la localidad tres, finca California	139
Figura 84A. Precipitación mensual registrada en la localidad uno, finca Agrícola del Sur	140
Figura 85A. Precipitación mensual registrada en la localidad dos, finca La Prosperidad.....	140
Figura 86A. Precipitación mensual registrada en la localidad tres, finca California	140
Figura 87A. Comportamiento de la capa freática la finca California	141
Figura 88A. Dinámica de la Eto y Etr en el ciclo fenológico del cultivo en la localidad uno, finca Agrícola del Sur	141
Figura 89A. Dinámica de la Eto y Etr en el ciclo fenológico del cultivo en la localidad dos, finca La Prosperidad	142
Figura 90A. Dinámica de la Eto y Etr en el ciclo fenológico del cultivo en la localidad tres, finca California	142
Figura 91A. Balance hídrico diario del testigo relativo de finca Agrícola del Sur.....	143
Figura 92A. Balance hídrico diario del tratamiento dos de finca Agrícola del Sur.....	143
Figura 93A. Balance hídrico diario del testigo relativo de finca La Prosperidad.....	144
Figura 94A. Balance hídrico diario del tratamiento dos de finca La Prosperidad	144
Figura 95A. Balance hídrico diario del testigo relativo de finca California.....	145
Figura 96A. Balance hídrico diario del tratamiento dos de finca California	145
Figura 97A. Menú Balance hídrico.....	147
Figura 98A. Menú caña.....	148
Figura 99A. Menú suelo.....	148

PÁGINA

Figura 100A. Información meteorológica requerida para estimar la evapotranspiración potencial en área	149
Figura 101A. Menú de ingreso a base de datos de Red Meteorológica de ICC	150
Figura 102A. Menú de descarga de información de sitio redmet de ICC	151
Figura 103A. Menú registro de riegos en Balance hídrico.....	153
Figura 104A. Muestreo de suelos en área de investigación.....	154
Figura 105A. Instalación de puntos de monitoreo con sonda FDR en área de investigación.....	154
Figura 106A. Realización de pruebas de uniformidad de riego durante evento de riego en área de investigación.....	155
Figura 107A. Georreferenciación de puntos de muestreo de dentro de lote de investigación.....	155
Figura 108A. Instalación de tubos piezométricos para monitoreo de nivel freático en área de investigación.....	156
Figura 109. Criterio de selección de punto de medición de humedad.....	161
Figura 110. Diagrama de proceso de instalación del tubo de acceso para la medición de humedad con sondas FDR.....	162
Figura 111. Toma de datos de humedad de suelo en campo usando sondas de capacitancia FDR	163
Figura 112. Visualización puntos de medición de humedad de suelo en aplicación Agromap®	164
Figura 113. Distribución de puntos de medición humedad dentro de finca La Prosperidad	165
Figura 114. Informe generado por agromap® sobre el contenido de humedad en el suelo por punto de medición	166
Figura 115. Gráfica de distribución de sondas de capacitancia tipo FDR, instaladas en fincas del Ingenio Santa Ana durante la zafra 2015/16	167
Figura 116. Extensión de betas arenosas dentro de regiones del Ingenio Santa Ana.....	168
Figura 117. Instalación de tubo para monitoreo de humedad en punto priorizado de finca.....	168

	PÁGINA
Figura 118. Ubicación de punto de muestreo de humedad con GPS Trimble R4®	169
Figura 119. Inscripción de punto de muestreo en la plataforma Agromap®.....	169
Figura 120. Monitoreo de humedad usando la sonda FDR DIVINER 2000®	170
Figura 121. Generación de informe de monitoreo de humedad usando la plataforma de Agromap®	170
Figura 122. Formato de registro de campo de las pruebas de uniformidad en el sistema de riego por aspersión	173
Figura 123. Instalación de recipientes recolectores en área donde se realiza prueba de uniformidad	174
Figura 124. Condición final de posiciones de riego simulada en una prueba de uniformidad	175
Figura 125. Medición de volumen de agua interceptada por recipiente recolector	175
Figura 126. Ubicación de recipientes recolectores para realización de prueba de uniformidad	179
Figura 127. Medición de presión de salida de agua de aspersor Komet Twin 101 Plus ..	179
Figura 128. Anemómetro portátil para medición de velocidad de viento durante prueba.....	180
Figura 129. Medición de parámetros de operación de motor durante prueba.....	180
Figura 130. Hidrómetro utilizado para medición de flujo de agua	181
Figura 131. Medición de pluviometría registrada en cada recipiente recolector instalado.....	181
Figura 132. Resultados obtenidos de prueba de uniformidad.....	182
Figura 133. Lavado de recipientes recolectores después de ejecución de pruebas de uniformidad	182
Figura 134. Informe de resultados de prueba de uniformidad realizada.	183

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	PÁGINA
Cuadro 1. Distribución de los sistemas de riego dentro del Ingenio Santa Ana a nivel de región	16
Cuadro 2. Distribución de equipos de riego a nivel de región dentro del Ingenio Santa Ana	17
Cuadro 3. Inventario de maquinaria propia para el desarrollo de labores de construcción y mantenimiento de obras de civil y obras de mitigación de riesgo.....	17
Cuadro 4. Análisis de pares paralela para la priorización de problemas	19
Cuadro 5. Jerarquización de problemas por frecuencia y Rango.....	20
Cuadro 6. Priorización de problemas identificados en el Departamento de Ingeniería Agrícola	20
Cuadro 7. Escala de clasificación de partículas del suelo según el Sistema Internacional, USDA.....	32
Cuadro 8. Coeficiente de cultivo por etapa fenológica para la caña de azúcar	37
Cuadro 9. Características de los estados fenológicos de la caña de azúcar	37
Cuadro 10. Constante dieléctrica de algunos compuestos químicos	53
Cuadro 11. Características generales de localidades estudiadas	57
Cuadro 12. Evapotranspiración potencial en finca Agrícola del Sur (2014 - 2016).....	59
Cuadro 13. Evapotranspiración potencial en finca La Prosperidad	61
Cuadro 14. Evapotranspiración potencial en finca California	64
Cuadro 15. Fecha de siembra, corte y duración del ciclo productivo de la caña en las localidades estudiadas	94
Cuadro 16. Fecha de finalización de etapas fenológicas de la caña en localidades estudiadas	94
Cuadro 17. Características físicas del suelo en localidades estudiadas	95
Cuadro 18. Características técnicas de aspersor Komet Twin 101	96
Cuadro 19. Determinación de tiempo y frecuencia de riego base para las localidades estudiadas	96

	PÁGINA
Cuadro 20. Distribución de lluvias y riego por etapa fenológica en los tratamientos y localidades evaluadas	98
Cuadro 21. Evapotranspiración, precipitación y riego en tratamientos de finca Agrícola del Sur.....	99
Cuadro 22. Evapotranspiración, precipitación y riego en tratamientos de finca La Prosperidad.....	100
Cuadro 23. Evapotranspiración, precipitación y riego en tratamientos de finca La Prosperidad.....	101
Cuadro 24. Evapotranspiración de referencia media diaria y acumulado mensual por localidad	103
Cuadro 25. Variación de las estimaciones realizadas con el balance hídrico respecto a las lecturas de la sonda FDR	104
Cuadro 26. Distribución de frecuencia de variaciones entre estimaciones del balance hídrico y las mediciones con sonda FDR	104
Cuadro 27. Producción de caña y azúcar por hectárea en localidades evaluadas	115
Cuadro 28. Resultado de análisis económico a través de la metodología de utilidades parciales.....	119
Cuadro 29. Resumen de resultados de pruebas de uniformidad realizadas durante la zafra 2015-2016	177
Cuadro 30. Resultados de pruebas de uniformidad de riego por aspersión realizadas durante la zafra 2015/2016 en el Ingenio Santa Ana	178

RESUMEN

El presente trabajo de graduación se divide en tres partes: el diagnóstico, la investigación y el informe de servicios realizados en el Departamento de Ingeniería Agrícola del Grupo Corporativo Santa Ana, ubicado en el municipio de Escuintla, Guatemala, realizado durante los meses de febrero a noviembre de 2016.

El diagnóstico recopila información primaria y secundaria sobre la conformación y estructura de la División Agrícola y Servicios, especialmente el Departamento de Ingeniería Agrícola. La información recopilada fue básica para determinar, a través de una matriz de priorización y jerarquización de problemas, las necesidades del departamento para el desarrollo de la investigación y los servicios ejecutados durante el Ejercicio Profesional Supervisado.

Grupo Corporativo Santa Ana se ubica en finca Cerritos, a 65.6 km de la ciudad de Guatemala a 220 m s.n.m., en el departamento de Escuintla. Se dirige por una junta directiva y se estructura en seis divisiones. Dentro de la División Agrícola y Servicios se encuentra el Departamento de Ingeniería Agrícola cuyo objetivo es velar por la infraestructura civil, el riego, el drenaje y el diseño agrícola de las fincas, componiéndose de tres áreas: Ingeniería Civil, Área de Riegos y Área de Diseño Agrícola y Topografía.

El trabajo de investigación se centró en la evaluación del efecto de dos programaciones de riego por aspersión tipo cañón sobre el rendimiento de la caña de azúcar, en plantía. El primer tratamiento consistió en una programación de riego con frecuencia constante de 15 días y tiempo de dos horas, sin tener en cuenta la etapa fenológica del cultivo, tipo de suelo, evapotranspiración potencial en el área, etc. El segundo tratamiento consistió en una programación de riego basada en un balance hídrico, enfocado en el requerimiento hídrico del cultivo en cada etapa fenológica y según la textura del suelo, las condiciones meteorológicas del área, etc. La investigación se estableció en tres localidades ubicadas en los estratos litoral y medio de la franja cañera.

La primera localidad se ubicó en la finca Agrícola del Sur, aplicando en ambos tratamientos siete eventos de riego, teniendo una producción similar en ambos tratamientos, testigo relativo con 129.8 TCH y el tratamiento con balance hídrico con 133.2 TCH, aplicando 382

y 374 mm de agua a cada tratamiento, respectivamente, pudiendo inferir que bajo las condiciones en las que se encuentra la finca, el manejo del riego basado en el balance hídrico coincidió con el manejo del riego en el testigo. En la segunda localidad ubicada en finca La Prosperidad se observó un incremento en la producción de 25.80 TCH, al basar la decisión del riego en un balance hídrico, consumiendo 314 mm de agua (ocho riegos) en el testigo y 497 mm de agua (11 riegos) en el balance hídrico, infiriendo que este incremento de producción en el balance hídrico se debió por satisfacer muy cercanamente la demanda de agua del cultivo durante la etapa de elongación ($K=0.8$). En finca California, localidad tres, se observó un incremento en la producción de 15.78 TCH al basar la decisión de riego en un balance hídrico, concluyendo que el incremento de producción se debió al manejo del riego en la etapa de elongación, al satisfacer el requerimiento hídrico del cultivo con un K de 0.9.

Se observa que las respuestas a riegos obtenidas se debieron fundamentalmente a la satisfacción de la demanda de agua durante la etapa de elongación y con la implementación del balance hídrico se observó un aumento del costo total del riego hasta US\$ 586.82/ha en finca California. Sin embargo, la utilidad parcial obtenida en el tratamiento con balance hídrico superó a la obtenida con el testigo por US\$150.77/ha en finca California y US\$1,134.18/ha en finca La Prosperidad.

Los servicios efectuados dentro del Departamento de Ingeniería Agrícola sirvieron de apoyo para el área de riegos, al recopilar información necesaria para la toma de decisiones y administración del riego en fincas. El primer servicio efectuado consistió en el monitoreo de la humedad del suelo usando sondas de capacitancia tipo FDR en distintas fincas del ingenio, logrando instalar y monitorear 68 puntos de medición en 1,226 ha de área productiva. El segundo servicio consistió en la realización de evaluaciones de uniformidad de riego en equipos con sistema de riego por aspersión, logrando realizar 21 pruebas, determinado que con el sistema de operación actual la uniformidad media del riego en el ingenio es de 71.7 %, considerándose aceptable al compararse con el rango de aceptación de 70 % a 80 %. Sin embargo, se observaron áreas que requieren intervención para mejorar la uniformidad del riego, cuyos valores son de 54 %, a marcos de riego de 63 por 63 metros, regando con velocidades de viento superiores a 10 km/hr.



CAPÍTULO I

DIAGNÓSTICO DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA, GRUPO CORPORATIVO SANTA ANA, ESCUINTLA, GUATEMALA

1.1 PRESENTACIÓN

La caña de azúcar es uno de los cultivos de mayor importancia económica en Guatemala, en el año 2015 ingresó al país por concepto de exportación de azúcar US\$ 850.68 millones, representando 8 % del total de las exportaciones del país (BANGUAT, 2016). Además de la exportación genera empleos directos e indirectos durante el proceso de producción y transformación. Grupo Corporativo Santa Ana cuenta con 3,200 colaboradores en la época de reparación y más de 5,700 en época de zafra, comprendida entre los meses de noviembre a mayo (Santa Ana, 2015).

Actualmente el grupo corporativo cuenta con más de 25,000 ha de área productiva, destinando el 70 % de la producción de azúcar a la exportación y 30 % para el consumo local; produce azúcar refinada tipo A, azúcar cruda, azúcar blanca Standard, azúcar refina, azúcar superior, azúcar morena, melaza, torta de cachaza y genera alrededor de 62 MWh de energía eléctrica en zafra. (Ingenio Santa Ana, 2013).

El ingenio se ubica en la finca Cerritos, a 64.5 km de la ciudad de Guatemala, a una altitud media de 220 metros sobre el nivel del mar. Santa Ana está dirigida por una junta directiva y se estructura en seis divisiones: la División de Recursos Humanos, División Agrícola y Servicios, División Administrativa, División Industrial, División de Informática y la División Financiera (Ingenio Santa Ana, 2013).

Dentro de la División Agrícola se encuentra el Departamento de Ingeniería Agrícola que tiene por objetivo velar por la infraestructura civil, el riego, el drenaje y el diseño agrícola de las fincas. Este departamento se compone de tres áreas: el área de Ingeniería civil se encarga del diseño y la ejecución de proyectos de construcción y mantenimiento de obras civiles, obras de mitigación de riesgos y la administración de maquinaria pesada propia y arrendada dentro de las fincas; el área de Riegos se encarga del diseño de los sistemas de riego dentro de las fincas, el mantenimiento de las fuentes de agua, la administración de los equipos de riego, el seguimiento de la eficiencia de los equipos y el monitoreo de la humedad del suelo; y el área de diseño agrícola y topografía se encarga de ejecutar las labores de diseño agrícola, el trazo de surcos, canales de riego y drenaje, la actualización de los diseños de finca, el levantamiento y dibujo de planos de fincas y la actualización de los planos de fincas en el ingenio. (Palala, 2014).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Conocer la situación actual del Departamento de Ingeniería Agrícola, del Grupo Corporativo Santa Ana, Escuintla.

1.2.2 Objetivos Específicos

- 1) Describir la estructura organizacional del Departamento de Ingeniería Agrícola.
- 2) Describir las funciones que desempeña el Departamento de Ingeniería Agrícola dentro del ingenio.
- 3) Identificar, detallar y priorizar los distintos problemas que enfrenta el Departamento de Ingeniería Agrícola.

1.3 METODOLOGÍA

1.3.1 Recopilación de información

La información se recopiló a través de fuentes primarias y secundarias, como entrevistas, reuniones y libros de texto escritos sobre el Departamento de Ingeniería Agrícola.

A. Información Primaria

Se realizó un sondeo abordando un dialogo con el jefe del Departamento de Ingeniería Agrícola recopilando información sobre las problemáticas, principales proyectos, la estructura organizacional del departamento, y las funciones, obligaciones y responsabilidad de personal de cada área que compone el departamento.

Se efectuaron visitas a campo para tener un panorama completo de las actividades que desempeña el departamento en el Ingenio Santa Ana. Durante las visitas se realizaron entrevistas al personal para conocer las condiciones en las que se ejecutan las labores de riego, drenaje, levantamientos topográficos, y diseño agrícola.

B. Información Secundaria

La información bibliográfica se obtuvo de tesis, artículos, libros, revistas, informes, y archivos electrónicos proporcionados por la División de Recursos Humanos y otras instituciones públicas y privadas.

1.3.2 Recursos utilizados

El Departamento de Ingeniería Agrícola proporcionó un vehículo para el traslado entre las fincas, combustible, y un equipo de cómputo, además de ello el apoyo del personal que a través de las entrevistas aportó información para el desarrollo del diagnóstico.

1.3.3 Sistematización de datos

Durante la ejecución del diagnóstico se recopiló y organizó información, la cual fue tabulada, analizada y priorizada a través de una matriz de priorización de actividades.

1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Ingenio Santa Ana fue fundada el año 1968, con la adquisición de los Ingenios Santa Juana y Canóvanas de Puerto Rico. En 1969 realizó su primera zafra, moliéndose 154,973.75 toneladas de caña, produciendo 239,525 quintales de azúcar en 136 días. En la zafra 1983/84 se inició la cogeneración entregando a la Empresa Eléctrica de Guatemala una potencia de 800 KW y en 1993 se instaló la refinería con capacidad de 500 toneladas de endulzante por día (Santa Ana, 2015).

1.4.1 Ubicación geográfica del Ingenio Santa Ana

El Ingenio Santa Ana se localiza en la finca Cerritos, a 65.6 km de la ciudad de Guatemala. Se encuentra a una altitud de 220 metros sobre el nivel del mar. Está situado a 4.5 km del municipio de Escuintla, colinda al Norte con la carretera que conduce hacia Santa Lucía Cotzumalguapa, al Sur y Este con el municipio de Masagua, y al Oeste con la finca Rancho María. Las instalaciones cuentan con una extensión de 423 ha (Pérez S., 2008).

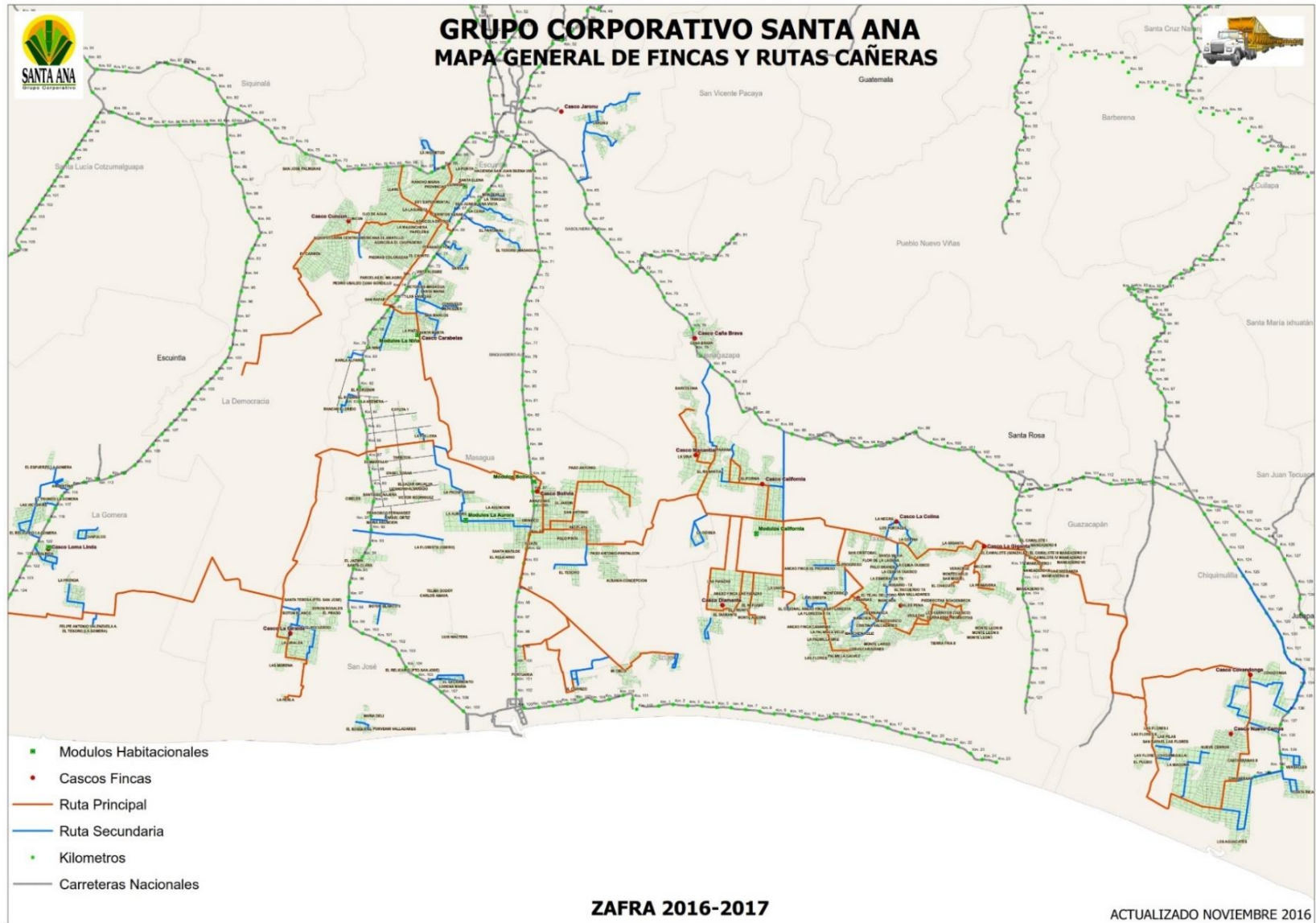


Figura 1. Fotografía aérea del Ingenio Santa Ana, marzo 2016

1.4.2 Vías de acceso

Se puede acceder al ingenio por la carretera al pacífico, a 4.5 km del municipio de Escuintla, y a 23 km de Santa Lucía Cotzumalguapa. Existe una red de calles de terracería, conocidas localmente como rutas cañeras, que interconectan todas las fincas con el casco del ingenio.

Esta red es utilizada mayormente en la época de zafra para transportar la caña de la unidad productiva a fábrica, existen también veredas y rondas para acceder a los lotes de las fincas (Pérez & López, 2002).



Fuente: Santa Ana, 2017

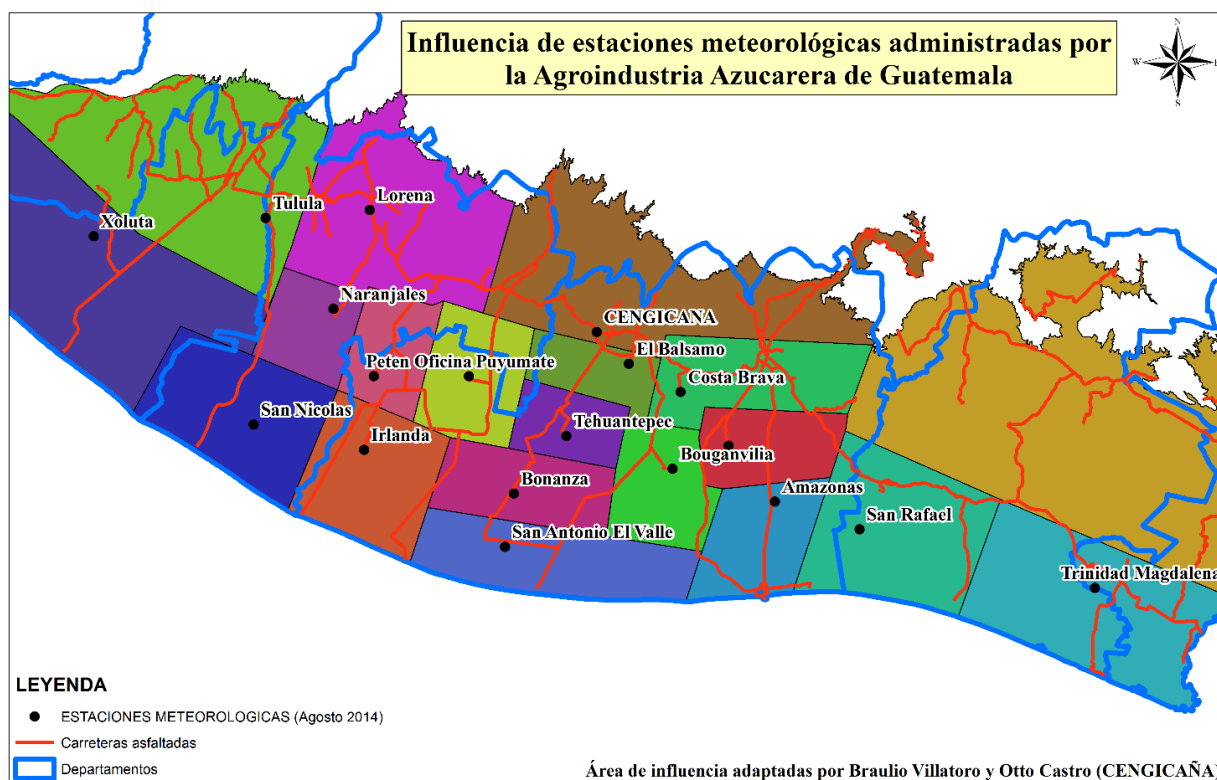
Figura 2. Mapa general de fincas y rutas cañeras utilizadas por Grupo Corporativo Santa Ana (noviembre, 2016)

1.4.3 Condiciones climáticas

La finca Cerritos presenta una temperatura media anual de 25.65 °C, precipitación pluvial entre 2,000 a 3,000 mm por año, distribuido en 8 meses de época lluviosa y humedad relativa promedio anual de 89 % (Pérez & López, 2002). La medición de estas variables meteorológicas se realiza a través de la red meteorológica del Instituto Privado de Investigación sobre el Cambio Climático -ICC- y la red de pluviómetros del Ingenio Santa Ana.

A. Red meteorológica

El Ingenio Santa Ana, utiliza la red de estaciones meteorológicas del ICC para estimar la evapotranspiración de referencia en cualquier punto de la zona cañera usando la ecuación de Penman-Monteith modificado por la FAO, a través de la influencia que tiene cada una de las 19 estaciones sobre las fincas (ICC, 2015).



Fuente: Cengicaña, 2015

Figura 3. Ubicación de estaciones meteorológicas administradas por la Agroindustria Azucarera de Guatemala

B. Red pluviométrica

El Ingenio Santa Ana inició con la instalación de pluviómetros y cuantificación de lluvias el año 1990, desde tal año el número de pluviómetros ha ido incrementándose hasta llegar a tener 122 pluviómetros instalados, en junio de 2016, la influencia de estos pluviómetros sobre las fincas del ingenio fue determinada a través de los polígonos de Thiessen.

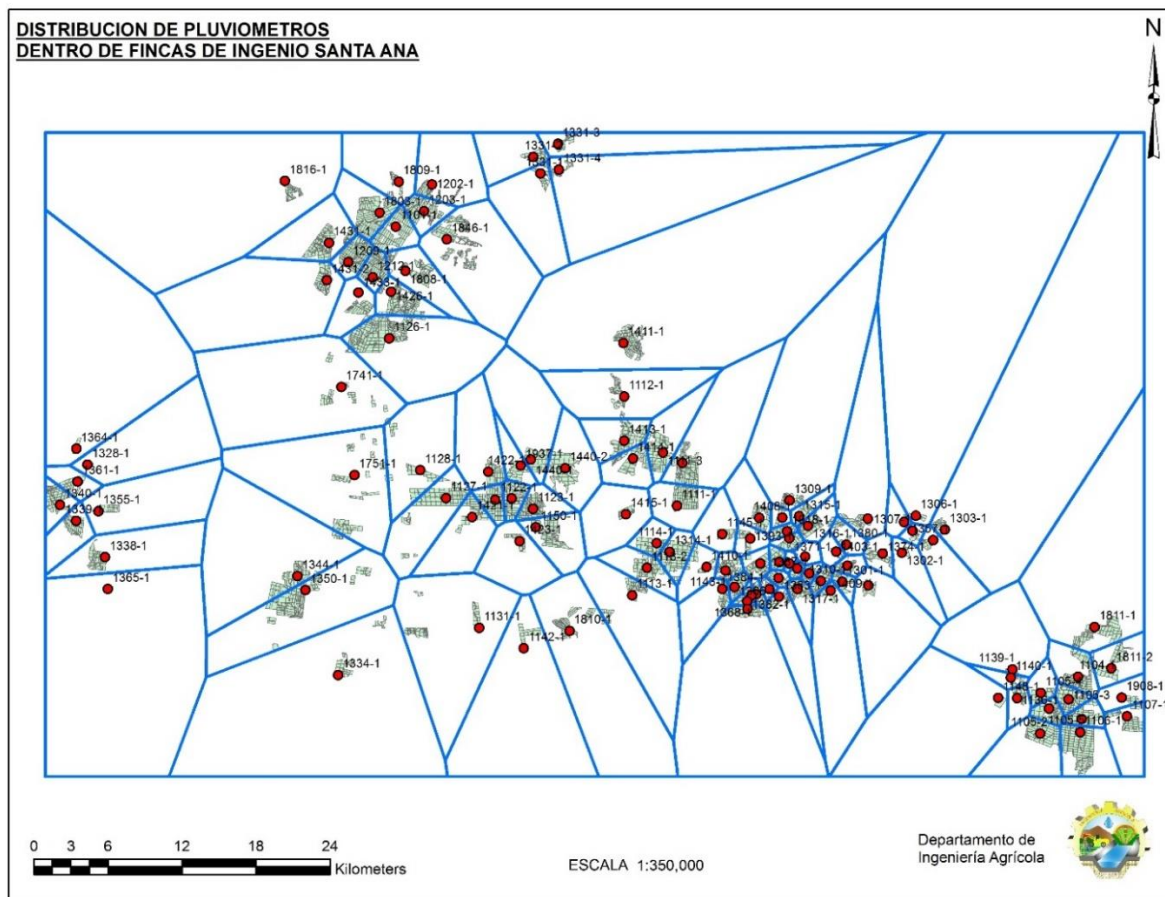


Figura 4. Distribución de pluviómetros dentro de las fincas del Ingenio Santa Ana, zafra 2015-2016

1.4.4 Actividades del ingenio

Santa Ana como grupo corporativo cuenta con 3,200 colaboradores, llegando a tener 5,700 en la época de cosecha (Zafra). A la fecha se muelen 20,000 Toneladas de caña diariamente que equivalen a una producción de 45,000 quintales de azúcar diarios, produciendo por año alrededor de 7 millones de quintales de azúcar, extraídos de 3.1 millones de Toneladas de caña (Santa Ana, 2015).

Santa Ana cuenta con 25,934 ha de extensión, compuesto por terrenos propios y arrendados donde se obtiene caña para la producción de azúcar. El 70 % de la producción de azúcar es para exportación y el 30 % es de consumo local. El Ingenio Santa Ana produce 14.1 % de la producción nacional de azúcar, produciendo azúcar crudo, azúcar estándar, azúcar refina, y melaza, además de la generación de 62.4 MWH de energía eléctrica en zafra (Santa Ana, 2015).

A. Mercado interno

Para el mercado interno se ofrece y comercializa azúcar blanca standard, azúcar refinada local, azúcar superior, azúcar morena, melaza, torta de cachaza y energía eléctrica (Ingenio Santa Ana, 2013), Las marcas bajo las cuales se comercializa el azúcar son: Caña Real, Don Justo Cabal, de Oriente y Nevada (Refino) (Santa Ana, 2015).

B. Mercado de Exportación

El grupo corporativo exporta a otros países azúcar refinada tipo A y azúcar crudo. El azúcar refinado tipo A es de color 0-45 grados ICUMSA (constituye el factor más importante para este tipo de azúcar), Pol 99.85 % mínima y humedad 0.004 %; en cambio, el azúcar crudo es todo aquel que presente un Pol mínimo de 97.9 por ciento (Ingenio Santa Ana, 2013).

1.4.5 Composición social y económica

Los trabajadores del ingenio proceden de los municipios de Masagua, Santa Lucía Cotzumalguapa y Escuintla. El horario laboral está constituido por 8 horas diarias, de lunes a viernes y sábados 4 horas. Aunque para época de zafra, algunos trabajadores claves, laboran los siete días de la semana.

1.4.6 Estructura Organizativa del grupo corporativo

A. Misión

Producir y comercializar azúcar, melaza y energía eléctrica a través del uso eficiente de nuestro recurso, generando desarrollo para mantenernos como una empresa competitiva y rentable en el mercado nacional e internacional.

B. Visión

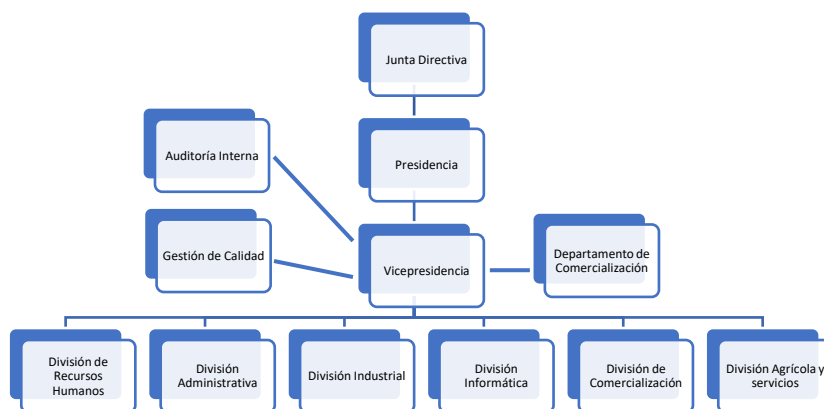
Ser una de las organizaciones líderes en la agroindustria azucarera, comprometida con la sociedad y el medio ambiente, cuya eficiencia operativa y financiera genere bienestar para nuestros accionistas, colaboradores, clientes y proveedores.

C. Valores

- Lealtad
- Flexibilidad
- Respeto
- Responsabilidad
- Honestidad
- Disciplina
- Transparencia

D. Estructura organizacional

Para el cumplimiento de los objetivos el Grupo Corporativo Santa Ana está estructurado jerárquicamente. Toda la organización está dirigida por una junta directiva, precedida por la presidencia y vicepresidencia. Bajo la vicepresidencia se encuentran las 6 divisiones operativas que constituyen el ingenio, además del Departamento de Comercialización, el Departamento de Gestión de Calidad, y el Departamento de Auditoría Interna. Las seis divisiones operativas son: la División de Recursos Humanos, División Administrativa, División Industrial, División Informática, División de Comercialización, y la División Agrícola y servicios (Pérez S., 2008).



Fuente: Santa Ana, 2015

Figura 5. Organigrama general del Grupo Corporativo Santa Ana

Cada división operativa tiene sus objetivos, misión y visión de las actividades que desarrolla, un resumen de ello se presenta a continuación.

a. División de Recursos Humanos

Su misión es satisfacer en forma eficaz los requerimientos de los recursos humano adecuado mediante técnicas y procedimientos actualizados, propiciando las condiciones óptimas para su desarrollo personal y profesional, con el propósito de lograr la mayor eficiencia del Grupo Corporativo (Ingenio Santa Ana, 2013).

b. División Administrativa

Es una división completamente de servicios, comprometida con las otras cinco divisiones de la corporación, su función es asistir las necesidades de las otras divisiones en forma eficiente y oportuna, a través de una organización adecuada, utilizando para ello recurso humano capacitado y tecnología para satisfacer sus clientes (Ingenio Santa Ana, 2013).

c. División Industrial

Se encarga de la transformación de la caña de azúcar y otros derivados, administrando recursos humanos, físicos, y tecnológicos para satisfacer las necesidades de los clientes nacionales e internacionales (Ingenio Santa Ana, 2013).

d. División de Informática

Se encarga de proporcionar soluciones relacionadas con la planificación, comunicación, tecnología de la información, automatización industrial y control de procesos, para optimizar la producción y administración (Ingenio Santa Ana, 2013).

e. División Financiera

Su función es administrar adecuadamente los recursos financieros de la corporación para la ejecución del proceso productivo. Su misión es generar información financiera confiable y oportuna, a través del desarrollo de recurso humano, de procedimientos y tecnología actualizada para que la administración del grupo corporativo pueda tomar las decisiones adecuadas en el momento oportuno (Ingenio Santa Ana, 2013).

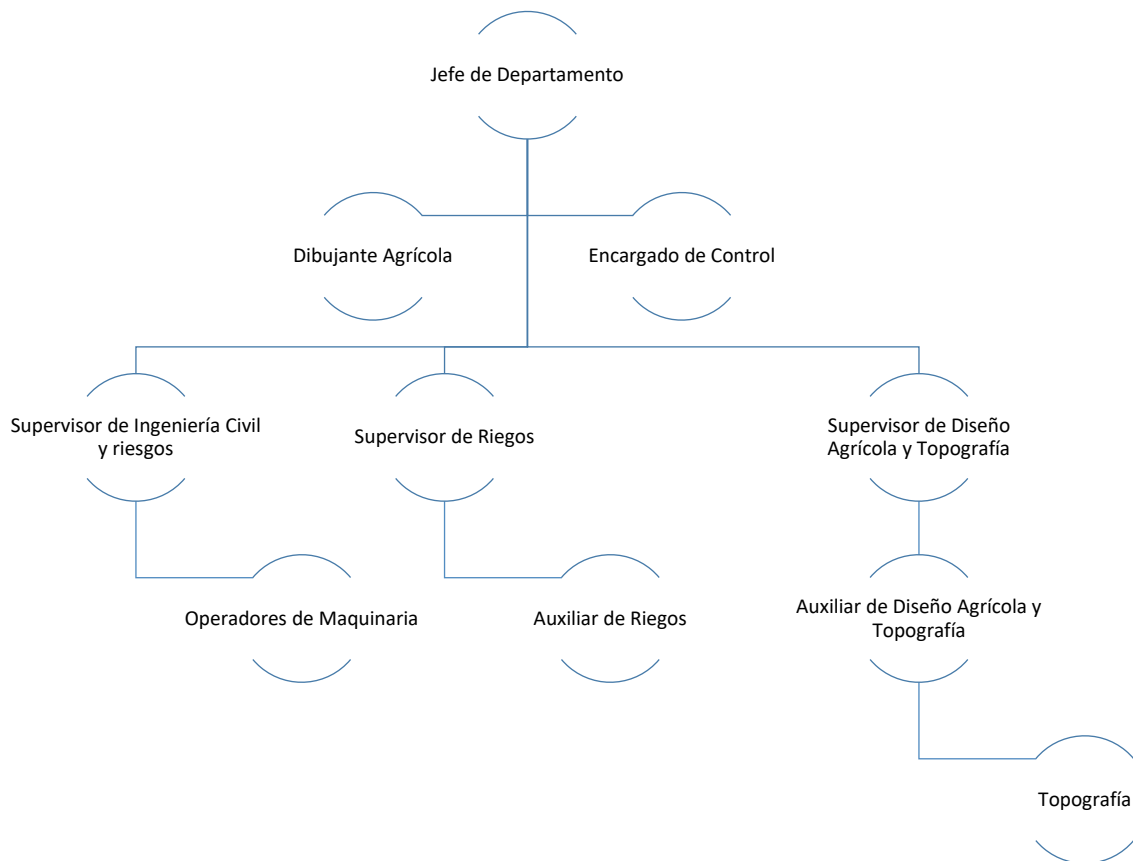
f. División Agrícola y Servicios

Está constituido por un equipo multidisciplinario cuyo compromiso fundamental es el aprovechamiento integral y sostenible de los recursos naturales, para producir caña de

azúcar y otros productos agrícolas, servicios de cosecha, talleres, y transporte (Ingenio Santa Ana, 2013).

1.4.7 Estructura organizacional del Departamento de Ingeniería Agrícola

El departamento se encuentra constituido por tres áreas que reportan al jefe del departamento, con apoyo de un dibujante agrícola y un encargado de control administrativo. Cada área es dirigida por un supervisor que, junto con el auxiliar de área, ejecuta todas las actividades que le corresponden, tal como se observa en el organigrama de la figura 6.



Fuente: Santa Ana, 2015

Figura 6. Organigrama del Departamento de Ingeniería Agrícola, Ingenio Santa Ana

1.4.8 Cargos y responsabilidades dentro del departamento

A. Área de riegos

El área de riego vela por que cada equipo de riego cuente con la cantidad justa de accesorios para cubrir las necesidades de riego de cada administración. Es responsable del

diseño e implementación de nuevos sistemas de riego, de la construcción y mantenimiento de fuentes de agua para el abastecimiento de presas, pozos, pocetas, norias, etc.

Durante la zafra el departamento se encarga del monitoreo de las horas laboradas y áreas laboradas diariamente, al igual que la eficiencia operativa del equipo de riego, el uso de combustible, el caudal de agua consumido y las auditorias técnicas de los equipos de riego.

Durante el año se responsabiliza del monitoreo de caudal de los principales ríos que pasan entre las fincas del ingenio, al igual que el monitoreo de la humedad del suelo usando sensores de humedad distribuidos en distintos puntos de las fincas del ingenio.

B. Área de ingeniería civil y riesgos

Es responsable de diseñar y llevar a cabo la construcción y mantenimiento de obras civiles dentro de las fincas nuevas y ya establecidas (pasos entubados, puentes, galeras, bodegas, etc.). Se encarga del diseño, construcción y mantenimiento de obras de mitigación de riesgos (bordas) en fincas. Se responsabiliza del seguimiento y actualización de la información para los seguros de infraestructura de la empresa; así como el seguimiento y la elaboración de reclamos en caso de siniestros.

Tiene a su cargo la administración de maquinaria pesada propia y arrendada para las labores de adecuación (Inversión y Mantenimiento de Infraestructura) de fincas tanto nuevas como ya establecidas.

C. Área de diseño agrícola y topografía

Es el responsable de la ejecución de labores de diseño agrícola de fincas nuevas (planimetría, altimetría, campificación, dirección del surqueado, canales de riego y drenaje, etc.), así como los cambios en el diseño de fincas ya establecidas.

Es el responsable de coordinar las actividades del Dibujante agrícola. La coordinación en la asignación y priorización de labores de las cuadrillas de topografía. De mantener actualizados los planos de las fincas y la comunicación con los encargados del sistema GIS. Y coordinar el establecimiento y actualización de la red de bancos de marca geodésicos en fincas.

1.4.9 Situación actual del departamento

A. Área de riegos

El Ingenio Santa Ana cuenta con 25,934.02 ha de extensión con 94.24 % del área cubierta con riego, a través de 8 sistemas. Administrativamente se divide en 7 regiones con áreas desde 2,500 hasta 4,500 ha. El sistema de riego por aspersión ocupa más del 55 % del área productiva, lo equivale a 14,485.53 ha, siendo el sistema más usado, el sistema de riego por inundación ocupa 11.25 % del área, seguido por el sistema de riego por avance frontal cubriendo 10.08 % del área, ocupando el primero, segundo y tercer lugar en extensión, respectivamente.

Cuadro 1. Distribución de los sistemas de riego dentro del Ingenio Santa Ana a nivel de región

SISTEMA DE RIEGO	REGION							AREA TOTAL	PROPORCION
	1	2	3	4	5	6	7		
Aspersión	3,425.81	1,045.31	2,118.99	1,890.53	3,087.72	712.77	2,204.40	14,485.53	55.86%
Avance Frontal			226.60		884.96	661.96	827.95	2,601.47	10.03%
Gravedad Aspersión						750.83		750.83	2.90%
Infiltración				64.38				64.38	0.25%
Inundación		1,110.00		155.96	24.11	1,349.57	280.15	2,919.79	11.26%
Inundación con mangas		571.27	21.93				427.30	1,020.50	3.93%
Mini aspersión	457.52	225.98	698.75		74.07			1,456.32	5.62%
Pivote			873.75	177.45			89.48	1,140.68	4.40%
Sin riego	794.57	184.62	46.32	244.50	77.08	3.00	144.43	1,494.52	5.76%
AREA TOTAL	4,677.90	3,137.18	3,986.34	2,532.82	4,147.94	3,478.13	3,973.71	25,934.02	100.00%
PROPORCIÓN	18.04%	12.10%	15.37%	9.77%	15.99%	13.41%	15.32%	100.00%	

Para el desarrollo de la labor de riego se cuenta con equipos de bombeo de distintas capacidades y para distintos usos, al igual que equipos de aspersión mecanizado como avances frontales y pivotes centrales. Entre pivotes, avances, y motobomba de distintas capacidades se cuenta con 241 equipos de riego a nivel de ingenio. Basado en el inventario de equipos de riego del departamento se observó que la región 3 cuenta con la mayor proporción de equipos de riego, acaparando 22.82 % de los equipos entre pivotes, avances y motobombas para riego por aspersión tipo cañón, mini aspersión y caudaleras.

Cuadro 2. Distribución de equipos de riego a nivel de región dentro del Ingenio Santa Ana

CATEGORIA	SISTEMA DE RIEGO	REGION 1	REGION 2	REGION 3	REGION 4	REGION 5	REGION 6	REGION 7	ESTACION EXPERIMENTAL	TOTAL
263	PIVOTE	0	0	0	0	1	0	0	0	1
264	PIVOTE	0	0	2	0	0	0	1	0	3
266	PIVOTE	0	0	4	1	0	0	1	0	6
267	AVANCE	0	0	1	0	3	0	2	0	6
269	ASPERSION	0	0	4	1	0	0	0	0	5
294	ASPERSION	36	10	14	11	21	6	21	0	119
305	ASPERSION	0	0	0	0	0	10	0	0	10
307	MINI ASPERSION	4	4	5	1	0	0	0	0	14
394	ASPERSION	0	1	4	8	2	0	1	1	17
396	CAUDAL	5	4	15	3	6	0	10	0	43
397	CAUDAL	0	1	2	0	0	0	2	0	5
398	CAUDAL	0	0	2	0	0	0	0	0	2
399	ASPERSION	0	0	0	0	0	3	0	0	3
3267	AVANCE	0	0	0	0	0	2	0	0	2
5294	ASPERSION	0	0	2	1	0	0	0	0	3
5397	CAUDAL	0	1	0	0	0	0	1	0	2
TOTAL		45	21	55	26	33	21	39	1	241
PROPORCION		18.67%	8.71%	22.82%	10.79%	13.69%	8.71%	16.18%	0.41%	100.00%

B. Área de ingeniería civil y riesgos

Para la construcción y mantenimiento de obras civiles y de mitigación de riesgos el área cuenta 7 maquinarias, entre excavadoras y retroexcavadoras, alquilando mensualmente un promedio de 18 máquinas, para la ejecución de las labores.

Cuadro 3. Inventario de maquinaria propia para el desarrollo de labores de construcción y mantenimiento de obras de civil y obras de mitigación de riesgo

CODIGO MAQUINA	TIPO
343-0016	EXCAVADORA DE ORUGA
342-0010	RETROEXCAVADORA DE LLANTAS
343-0015	EXCAVADORA DE ORUGA
343-0020	EXCAVADORA DE ORUGA (LEASING)
342-0012	RETROEXCAVADORA DE LLANTAS (LEASING)
343-0019	EXCAVADORA DE ORUGA
343-0017	EXCAVADORA DE ORUGA

C. Área de diseño agrícola y topografía

Para la ejecución de las labores de diseño agrícola, campificación, trazo de surcos y trazo de canales se cuenta con una red de bancos de marca a nivel de ingenio, ubicados estratégicamente para el enlace de equipos de topografía mejorando su precisión a nivel milimétrico. Para la zafra 2015-2016 el ingenio contaba con 51 bancos de marca

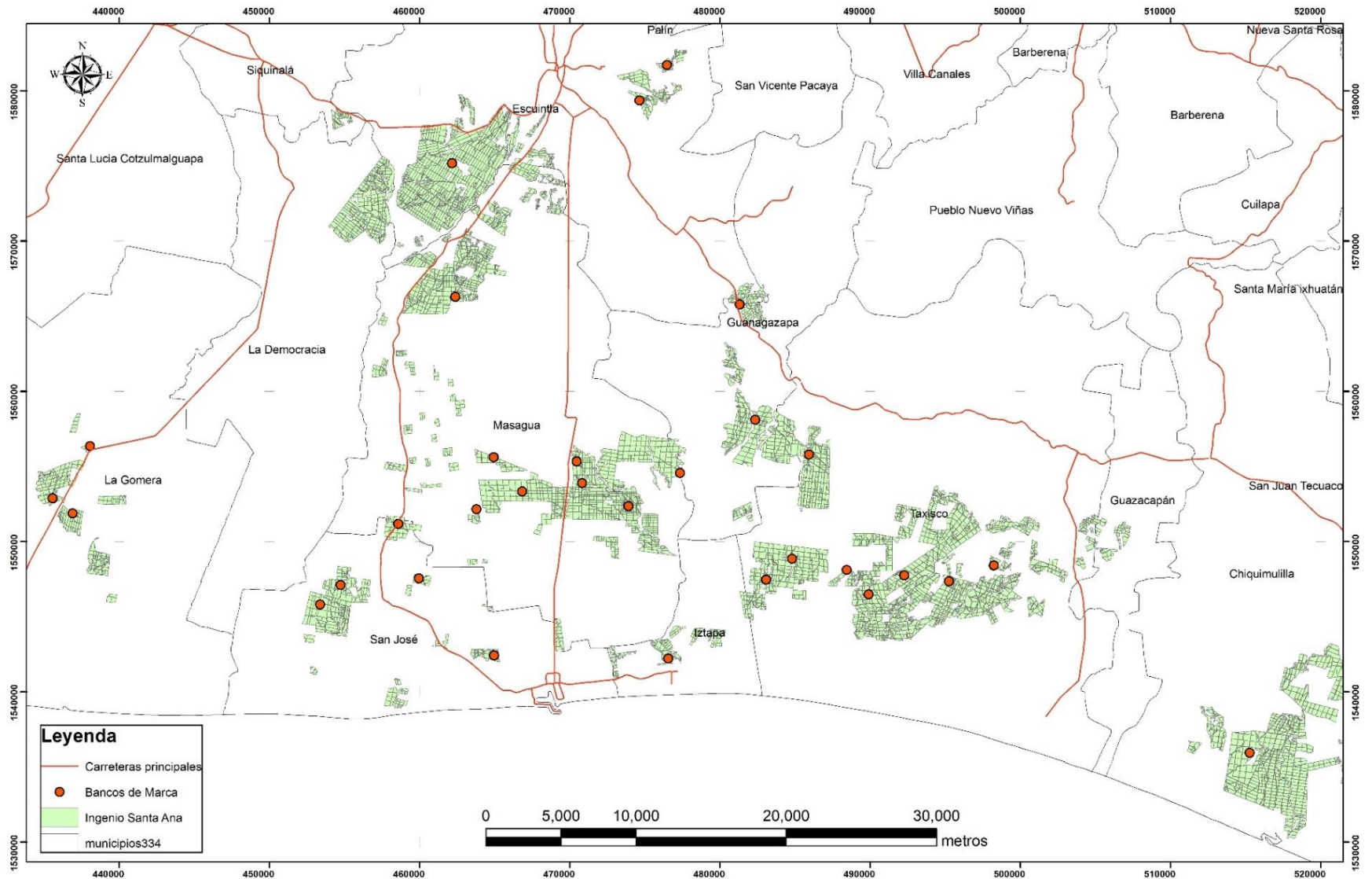


Figura 7. Red de bancos de marca geodésicas dentro del Ingenio Santa Ana Zafra 2015/2016

1.4.10 Matriz de priorización de problemas

Una matriz de priorización es utilizada para la jerarquización de problemas encontrados en un diagnóstico, permite ordenar los problemas por importancia a través de la ponderación y la aplicación de criterios, facilitando la toma de decisión y enfocarse en la búsqueda de soluciones a los problemas con mayor importancia.

Basado en la información recopilada se determinó que el área con más oportunidades de mejora, tanto en la rama operativa como en la científica, es el área de riegos por lo que se tomó la decisión de trabajar en esta área.

Como ente regulador del riego dentro de la corporación el área requería una alternativa a la programación actual usada, de 2 horas y 15 días de tiempo y frecuencia de riego, respectivamente, por lo que se planteó la idea de un proyecto de investigación para comparar la programación actual con una programación con criterios basados en un balance hídrico. Entre las funciones y responsabilidades del departamento se encuentra el monitoreo de la humedad del suelo a través de sondas de capacitancia tipo FDR (Frequency Domain Reflectometry) y la evaluación de la calidad técnica de riego en las fincas del ingenio durante la época seca; por la extensión del ingenio y la falta de personal se consideró prioritario el desarrollo de estas actividades, los que se describen en el cuadro 4 a través de una matriz de priorización de problemas.

Cuadro 4. Análisis de pares paralela para la priorización de problemas

PROBLEMA	Evaluación del efecto de dos programaciones de riego por aspersión tipo cañón sobre el rendimiento de caña de azúcar (<i>Saccharum spp.</i>)	Monitoreo de la humedad del suelo a través de sondas tipo FDR	Evaluación de la calidad técnica del sistema de riego por aspersión tipo cañón
Evaluación del efecto de dos programaciones de riego por aspersión tipo cañón sobre el rendimiento de caña de azúcar (<i>Saccharum spp.</i>)		Evaluación del efecto de dos programaciones de riego por aspersión tipo cañón sobre el rendimiento de caña de azúcar (<i>Saccharum spp.</i>)	Evaluación del efecto de dos programaciones de riego por aspersión tipo cañón sobre el rendimiento de caña de azúcar (<i>Saccharum spp.</i>)
Monitoreo de la humedad del suelo a través de sondas tipo FDR	Evaluación del efecto de dos programaciones de riego por aspersión tipo cañón sobre el rendimiento de caña de azúcar (<i>Saccharum spp.</i>)		Monitoreo de la humedad del suelo a través de sondas tipo FDR
Evaluación de la calidad técnica del sistema de riego por aspersión tipo cañón	Evaluación del efecto de dos programaciones de riego por aspersión tipo cañón sobre el rendimiento de caña de azúcar (<i>Saccharum spp.</i>)	Monitoreo de la humedad del suelo a través de sondas tipo FDR	

Cuadro 5. Jerarquización de problemas por frecuencia y Rango

No.	Problemas identificados	Frecuencia	Rango
1	Evaluación del efecto de dos programaciones de riego por aspersión tipo cañón sobre el rendimiento de caña de azúcar (<i>Saccharum spp.</i>)	3	1
2	Monitoreo de la humedad del suelo a través de sondas tipo FDR	2	1
3	Evaluación de la calidad técnica del sistema de riego por aspersión tipo cañón	1	1

Cuadro 6. Priorización de problemas identificados en el Departamento de Ingeniería Agrícola

No.	Problemas identificados
1	Evaluación del efecto de dos programaciones de riego por aspersión tipo cañón sobre el rendimiento de caña de azúcar (<i>Saccharum spp.</i>)
2	Monitoreo de la humedad del suelo a través de sondas tipo FDR
3	Evaluación de la calidad técnica del sistema de riego por aspersión tipo cañón

1.5 CONCLUSIONES

1. El Departamento de Ingeniería Agrícola se conforma del jefe de departamento, un dibujante, un encargado de control, el supervisor de Ingeniería Civil, el supervisor de Riegos, y el supervisor de Diseño Agrícola y Topografía, encargándose de la administración del riego, la planificación agrícola y la construcción de obras civiles de mitigación de riesgos dentro de las fincas del ingenio.
2. El Departamento de Ingeniería Agrícola tiene tres áreas de trabajo, el área de riegos que se encarga de la administración de los equipos de riego, poniendo énfasis en el monitoreo y control de eficiencias de operación y combustible, el seguimiento de hidrómetros, sensores de humedad y auditoría de la calidad técnica/operativa de los equipos de riego; el área de ingeniería civil se encarga del diseño, construcción y mantenimiento de obras civiles, y la administración de maquinaria; el área de diseño agrícola y topografía se encarga del levantamiento de información altimétrica y planimétrica de fincas, la actualización de planos de registro, y el mantenimiento de marcas geodésicas dentro del ingenio.
3. Dentro del departamento se tomó como prioridad evaluar el efecto de dos programaciones de riego por aspersión tipo cañón sobre el rendimiento de la caña de azúcar, en plantía; monitorear la humedad del suelo a través de sondas de capacitancia tipo FDR en lotes críticos del ingenio, y evaluar la uniformidad del riego dentro de las fincas del ingenio.

1.6 BIBLIOGRAFÍA

Banco de Guatemala (BANGUAT). (2016). *Estadísticas macroeconómicas*. Recuperado el 1 de abril de 2016, de BANGUAT:

<http://www.banguat.gob.gt/inc/main.asp?id=111348&aud=1&lang=1>

Ingenio Santa Ana, Guatemala. (2013). *Descripción general de Ingenio Santa Ana*.

Recuperado el 25 de marzo de 2016, de Grupo Corporativo Santa Ana:

www.santaana.com.gt/espanol.htm

Ingenio Santa Ana, Guatemala. (2015). *Conociendo mi ingenio, manual de inducción*.

Escuintla, Guatemala: Grupo Corporativo Santa Ana.

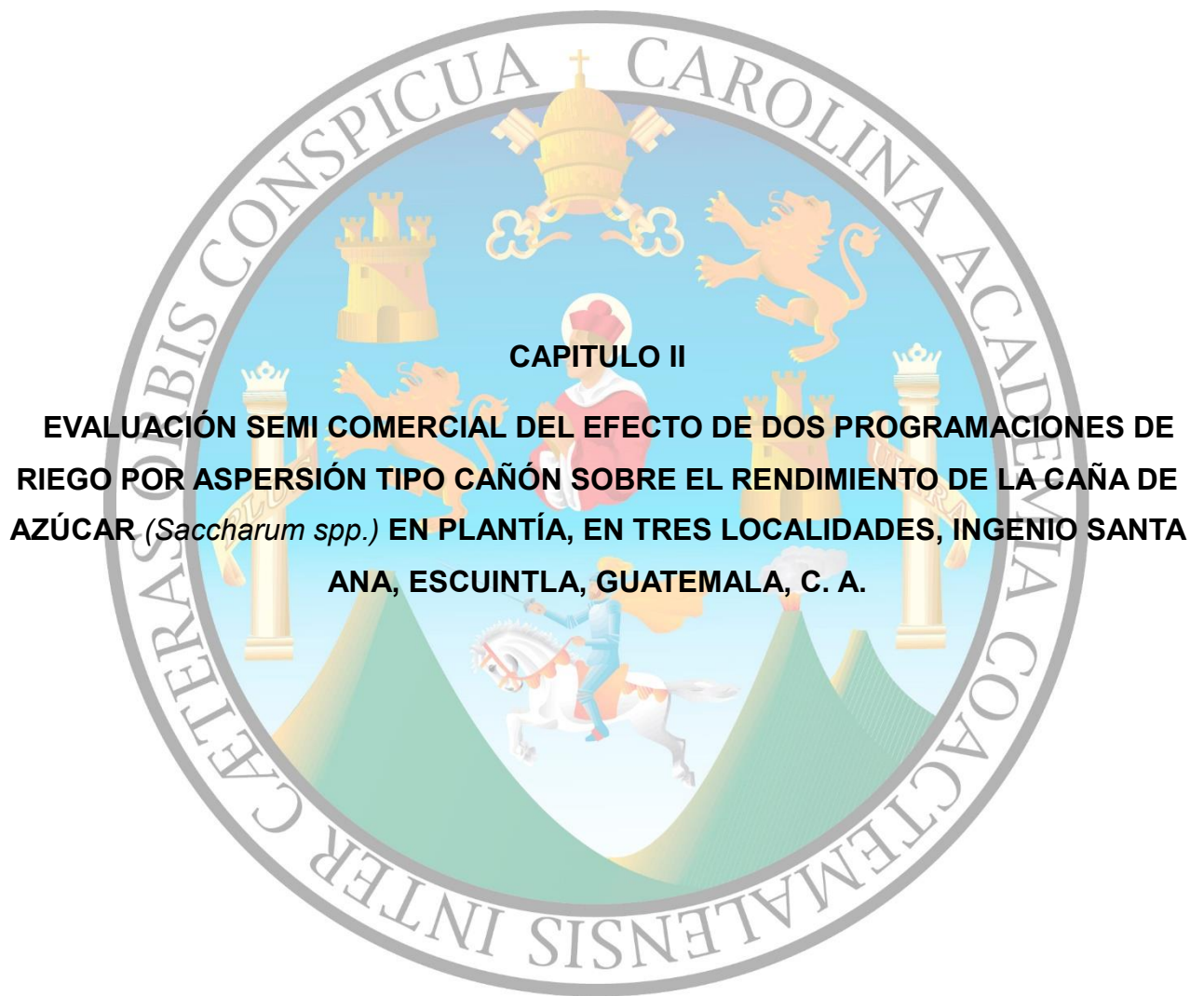
Instituto Privado de Investigaciones sobre el Cambio Climático, Guatemala (ICC). (2015).

Redmet. Recuperado el 14 de mayo de 2016, de Redmet: <https://redmet.icc.org.gt/>

Palala, M. A. (2014). *Plan estratégico Departamento de Ingeniería Agrícola*. Escuintla, Guatemala: Ingenio Santa Ana.

Pérez, J., & López, E. (2002). *Nivel de daño económico para las plagas de importancia en caña de azúcar y su estimación con base en un programa diseñado por CENGICAÑA*. Escuintla, Guatemala: CENGICAÑA.

Pérez, S. (2008). *Elaboración de la documentación previa a la certificación ISO 9001:2000 de los laboratorios de parasitoides Cotesia Favipes*, Ingenio Santa Ana, Escuintla. Tesis Ing. Mecánico Industrial. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 322 p.



CAPITULO II

EVALUACIÓN SEMI COMERCIAL DEL EFECTO DE DOS PROGRAMACIONES DE RIEGO POR ASPERSIÓN TIPO CAÑÓN SOBRE EL RENDIMIENTO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum spp.*) EN PLANTÍA, EN TRES LOCALIDADES, INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C. A.

2.1 PRESENTACIÓN

La agroindustria azucarera atraviesa una crisis a nivel nacional por la reducción en los precios internacionales del azúcar, los altos costos de producción y los crecientes problemas sociales, ambientales y políticos que conlleva la extracción de agua superficial en la franja cañera guatemalteca, obligando a ser más eficientes en el uso de este recurso. Como resultado de la búsqueda de alternativas para mejorar la eficiencia en el uso del agua para riego, dentro del Ingenio Santa Ana, se propone implementar un sistema de programación de riego basada en criterios técnicos, usando como principal herramienta el balance hídrico, para migrar del sistema de programación actual, basada en criterios administrativos y de disponibilidad de equipos.

La programación de riego usada actualmente en el ingenio se basa únicamente en la disponibilidad de equipos, estableciendo frecuencias de riego de 15 días y tiempos de riego de 2 horas, sin tomar en cuenta criterios técnicos como: características físicas del suelo, etapa fenológica del cultivo, evapotranspiración potencial en el área, etc. Todo ello conlleva un uso ineficiente de agua y de los recursos que dispone la empresa, por lo que surge la necesidad de buscar herramientas que permitan realizar la programación del riego enfocándose en los requerimientos hídricos de cada lote según las características que presente.

Para evaluar el efecto de la programación de riego basada en un balance hídrico sobre la producción de caña, el costo del riego y las utilidades a obtener sobre la programación actualmente usada dentro del ingenio se establecieron parcelas semi comerciales en tres localidades ubicadas en las fincas Agrícola del Sur, La Prosperidad y California, cumpliendo con tres criterios de selección establecidos: 1) caña plantía, 2) sistema de riego por aspersión tipo cañón y 3) representatividad del estrato litoral y medio.

El primer tratamiento establecido fue el testigo relativo consistiendo en frecuencias de riego de 15 días y tiempos de riego de 2 horas; el segundo tratamiento consistió en una programación basada en un balance hídrico por lo que el tiempo y frecuencia de riego fue variable.

Durante el desarrollo de la investigación se realizaron pruebas de uniformidad para determinar la lámina de agua aplicada por riego, seguimiento de las variables biométricas altura, población y longitud de entrenudos en cada tratamiento, además del monitoreo de la capa freática y mediciones semanales del contenido de humedad en el suelo usando sondas de capacitancia tipo FDR.

Los tratamientos evaluados se cosecharon 11 meses después de la siembra, observando que el efecto de las programaciones de riego sobre la producción de caña varía en función de las características del suelo y la condición meteorológica del área. En Agrícola del Sur el manejo dado al tratamiento con balance hídrico coincidió con el testigo relativo, debido a las condiciones meteorológicas predominantes en el área, aplicando por ciclo productivo 7 riegos, consumiendo en promedio 380 mm de agua, produciendo en el testigo relativo 129.8 TCH y en el tratamiento con balance hídrico 133.2 TCH. En La Prosperidad la producción del testigo relativo fue de 97.49 TCH, superado por el tratamiento con balance hídrico cuya producción fue de 123.36 TCH, aumentando la producción 25.87 TCH por los tres riegos extras aplicados a este tratamiento, generando una utilidad parcial sobre la obtenida con el testigo relativo de US\$ 1,134.18. Y en finca California, la producción obtenida en el tratamiento con Balance hídrico aumentó 15.78 TCH, en comparación al testigo relativo, cuya producción fue de 151.36 TCH, obteniendo una utilidad parcial de US\$ 150.77 en el tratamiento con balance hídrico.

El balance hídrico simula una contabilidad de agua en el suelo permitiendo comparar las ganancias y pérdidas de humedad producidas durante el día y con ello anticipar la fecha y la lámina de agua a reponer a través del riego. Con los resultados obtenidos de la investigación se asevera que el uso del balance hídrico en la programación de riego eficiente el uso del agua, aunque dependiendo de las condiciones meteorológicas y textura de suelo sus efectos se perciben en mayor o menor intensidad, incluso en áreas con aporte capilar se requieren metodologías precisas que permitan estimar con precisión este aporte, de lo contrario la herramienta presenta estimaciones poco precisas.

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 Marco Conceptual

A. Importancia económica de la caña de azúcar

La caña de azúcar es uno de los cultivos de mayor importancia económica para Guatemala (figura 8). Durante el año 2015 representó 8 % de las exportaciones del país y según reportes del Banco de Guatemala llegó a representar el 12 % de las exportaciones en el año 1998, generando un ingreso aproximado de US\$ 316.7 millones (BANGUAT, 2016).

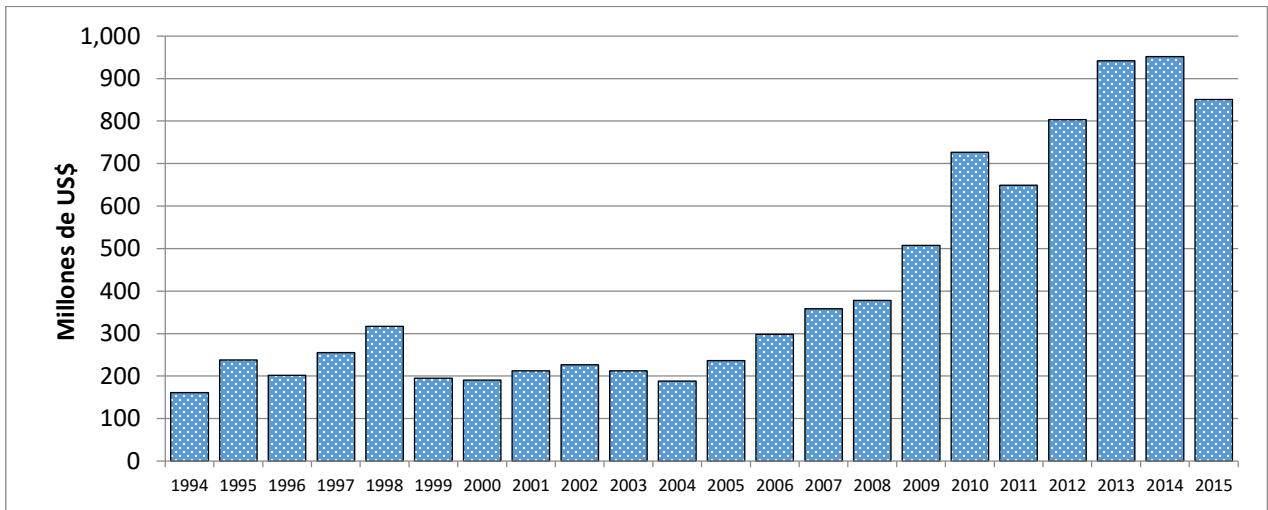


Figura 8. Valor FOB, en millones de US\$, de la exportación de azúcar de Guatemala de 1994 a 2015

B. Riego en la caña de azúcar

El cultivo de la caña de azúcar tiene sus orígenes en los trópicos húmedos y su mayor productividad se obtiene cuando la cantidad de agua que recibe el cultivo es adecuada y cuando el suelo tiene un buen drenaje, lo que permite el crecimiento de las raíces y cuando se somete a un estrés que estimule la concentración de sacarosa durante la maduración para cumplir los requerimientos de agua. En Australia desde 1995 se regaba el 40 % del área producida (Holden & Rozeff, 1998), alrededor del mismo año en el valle de Cauca, Colombia se reportaba 53 % del área bajo riego, predominando el riego por surco alterno (Isaacs, Carrillo, & Caicedo, 1998).

La caña de azúcar como cualquier otra especie vegetal requiere de varios recursos para crecer y desarrollarse, sin embargo, uno de los recursos que requiere en abundancia es el agua. No obstante, las plantas solo conservan aproximadamente el 3 % del total del volumen del agua que absorben, el resto asciende desde la raíz hasta la superficie de las hojas, donde es evaporada en forma de transpiración (Muñoz, 2009).

Por ser un cultivo de larga duración que produce grandes cantidades de biomasa, la caña de azúcar es una de las plantas con mayor requerimiento de agua. La duración del ciclo vegetativo varía según el área de producción, dura entre 12 a 18 meses en la India, 13 a 14 meses en Irán, 16 meses en Isla de Mauricio, 13 a 19 meses en Jamaica, 15 meses en Australia, 20 a 24 meses en Hawái, mientras en Guatemala no supera los 12 meses (NETAFIM, 2017).

En Guatemala existen dos épocas contrastantes de condiciones climáticas, la época seca y lluviosa; la época seca se presenta de noviembre hasta los últimos días del mes de abril en el estrato alto y medio, mientras en el estrato bajo se alarga hasta finales de mayo. Dada la configuración geomorfológica de la región la distribución de las lluvias es irregular tanto en tiempo como en espacio, variando de 5,000 mm de lluvia en el estrato alto hasta 1,000 mm en la planicie costera, estrato bajo (Juárez & Muñoz, 1998).

El riego dentro de la franja cañera guatemalteca toma auge en el año 1990, para el año 2000 el área bajo riego ya era de 61 % y para el 2010 el área cubierta superaba el 80 % del área productiva (Castro & Monterroso, 2012). El riego suplementario se ha vuelto algo muy común en el cultivo de caña ya que según experiencias la producción con riego es más estable y de mayor magnitud, así como por las ventajas colaterales que ofrece, tales como; siembras tempranas, la aplicación de fertilizantes, herbicidas, mejoramiento del rebrote, mayor número de cortes y otros (Juárez & Muñoz, 1998).

Juárez y Muñoz (1998) definen 5 ventajas de la aplicación del riego en caña de azúcar: - Incrementa el rendimiento y asegura la producción comercial del cultivo, -El rebrote es más rápido, especialmente cuando se presenta un periodo seco después de la cosecha, - Incrementa el número de socas en el cultivo, y -Mejora la germinación en condiciones de suelos difíciles de cultivar (Madrigales, 2013).

Siendo la agricultura el mayor consumidor de agua en el mundo y dada la magnitud de las inversiones en riego realizadas por la agroindustria azucarera, así como por los costos de operación de los sistemas de riego, CENGICAÑA, juntamente con los ingenios azucareros, iniciaron estudios en 1994 tendientes a desarrollar un proceso de optimización del agua de riego en los diferentes ambientes de la zona cañera (Juárez & Muñoz, 1998).

En 1990 los sistemas de riego predominantes en la caña de azúcar eran los sistemas por gravedad, tipo inundación y aspersión, tipo cañón; a partir de 1998 empezaron a surgir nuevas alternativas tecnológicas. Apareció el riego por inundación con surcos alternos y los sistemas de bombeo para deriva de agua y regar por aspersión tipo cañón (Castro O., 2011).

Para la zafra 2015/2016 el riego había crecido en área 6.1 veces más que el reportado durante la zafra 1990/1991. Esto generó un incremento en el uso del agua y un aumento en el costo de energía, de tal manera que la actividad del riego ha ido evolucionando estratégicamente a sistemas que operan a mediana presión, desplazando los sistemas de riego por inundación por surco y sistemas de alta presión como el riego con aspersor tipo cañón (CENGICAÑA, 2017).

Siguiendo la estrategia de eficientización de recursos se ha venido desarrollando tecnologías que permitan cuantificar y evaluar la eficiencia en el uso del agua, al igual que el monitoreo de la humedad del suelo como: las evaluaciones de uniformidad de riego, el monitoreo de la humedad del suelo a través de sondas de capacitancia, y la estimación de la humedad del suelo a través de la cuantificación de variables agrometeorológicas usando el Balance Hídrico (CENGICAÑA, 2017).

C. Balance Hídrico

La programación del riego mediante el balance hídrico permite conocer cuándo y cuánto regar para reponer la humedad del suelo consumida por la planta (Pardo & Proaño, 2008). Puede considerarse como una contabilidad del agua en el suelo permitiendo comparar las ganancias y las pérdidas de humedad ocurridas en el suelo durante un lapso determinado de tiempo (Torres J., 1995). El suelo aumenta su contenido de humedad cuando ocurre un evento de lluvia o riego. En campo también ocurren ganancias de humedad por contribución del nivel freático, escorrentías o por flujos sub-superficiales desde áreas cercanas. En

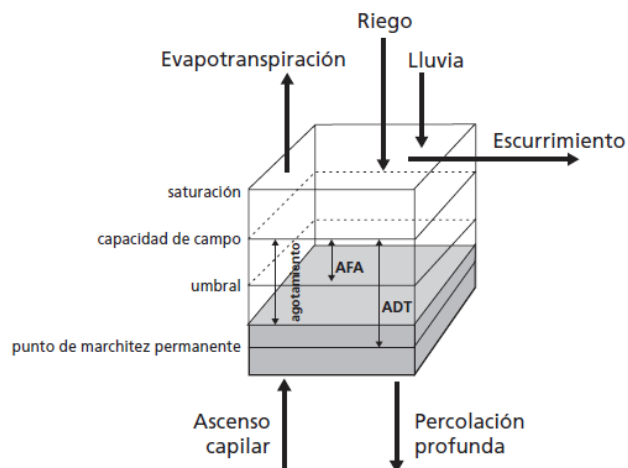
cambio, ocurren pérdidas de humedad por transpiración de la planta, la evaporación de agua en la superficie del suelo, por la percolación y por escorrentía superficial.

El balance hídrico permite realizar la programación del riego tomando en cuenta la relación suelo-planta-clima adaptando la frecuencia y tiempo de riego a los requerimientos del cultivo y la capacidad de retención del suelo (Castro O., 2014). Bajo este contexto de planificación, la aplicación del agua a través del riego se realiza en un momento oportuno, de tal manera que la evapotranspiración en la caña sea siempre la óptima, reduciendo así el estrés hídrico (Castro & Monterroso, 2012).

El balance hídrico es un proceso que opera en forma natural. Al conocerse los factores que influyen en la dinámica del agua en el suelo, fácilmente puede predecirse los cambios en el contenido de humedad disponible en el suelo y con ello anticipar la próxima fecha de riego (Torres J., 1995). El balance hídrico permite integrar las variables del clima para determinar las necesidades de riego en un periodo de tiempo determinado con el fin de planificar, diseñar y operar del recurso hídrico en la zona que se desea (Guarnizo, 2007).

a. Componentes base del balance hídrico

La herramienta del balance hídrico estima la humedad en el suelo tomando en cuenta las características de los factores determinantes del contenido de humedad en la zona radicular, que son: el suelo, que sirve de almacén para el agua; la planta consumidora principal y la meteorología que influye en la entrada y salida de agua del sistema (figura 9).



Fuente: Allen, Pereira, Raes & Smith, 2006

Figura 9. Balance de agua en la zona radicular, entradas y salidas de agua en el suelo

La cantidad de agua que entra a la zona radicular está en función del ascenso capilar, riego, y lluvia. En cambio, las salidas de agua están en función de la percolación profunda, el escurrimiento superficial, y la evapotranspiración. Manteniendo el agua entre la saturación y la sequedad total. Para el manejo agrícola el suelo debe mantenerse entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

Basado en cada uno de estos componentes se plantea la ecuación del balance hídrico. El contenido en el suelo (CHS) aumenta cuando ocurre un evento de precipitación (P) o cuando se aplica el riego (R), y cuando existe aporte capilar (Ac). Las pérdidas de agua en el suelo ocurren principalmente por evapotranspiración (Evt) y la percolación profunda (Pp) (Torres J., 1995). Tal relación se expresa de la forma siguiente:

$$CHS = P + R + Ac - Evt - Pp$$

i. Características físicas del suelo

El suelo es el sustrato donde se almacena el agua, por lo que es necesario conocer varias de sus características físicas relacionadas con esta propiedad, entre ellas está: la textura, la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, y la densidad aparente.

- a) **Textura:** Hace referencia a las proporciones de arena, limo, y arcilla que presenta el suelo. Los valores se especifican en porcentajes de partículas totales cuyo tamaño está comprendido entre límites determinados, según diversas escalas como la del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos -USDA- o la de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo ISSS (Sandoval, 2007).
- b) **Capacidad de campo:** Es un parámetro físico del suelo que refleja el contenido de humedad que el suelo puede retener inmediatamente después que el agua gravitacional ha drenado. Es la máxima cantidad de agua que el suelo puede retener en contra de la fuerza de gravedad. La tensión a la que el agua está retenida cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo varía entre 1/10 a 1/3 de atmosfera (Sandoval, 2007).
- c) **Punto de marchitez permanente:** Es el porcentaje de humedad en el suelo al cual las plantas no pueden obtener suficiente humedad para satisfacer sus requerimientos de transpiración, al alcanzar el suelo este contenido de humedad las plantas se

marchitan y no son capaces de recuperarse. El punto de marchitez permanente corresponde al límite inferior de la humedad aprovechable por las plantas.

- d) **Densidad aparente:** Corresponde al peso del suelo por unidad de volumen que incluyen los poros, este valor se expresa en g/cm^3 .

Cuadro 7. Escala de clasificación de partículas del suelo según el Sistema Internacional, USDA

Dimensión de la partícula elemental (mm)	Atterberg – (Sistema Internacional)	U.S. Dep. De Agricultura
<0,001	Arcilla	Arcilla
<0,002		
0,005	Limo	Limo
0,01		
0,02		
0,05	Arena fina	Arena muy fina
0,1		Arena fina
0,25		
0,2		
0,5	Arena gruesa	Arena gruesa
1,0		Arena muy gruesa
2,0		
3,0	Grava fina	Grava fina
5,0		
10,0	Grava	Grava
20,0	Grava gruesa y piedras	Grava gruesa y piedras
>20,0		

Fuente: Hillel, D., 2004

ii. Características fenológicas del cultivo

El balance hídrico se establece para monitorear la humedad en el suelo, abasteciendo a la planta de la cantidad justa de agua que requiere. Para determinar los requerimientos de agua de la planta es necesario conocer sus características fenológicas y fisiológicas.

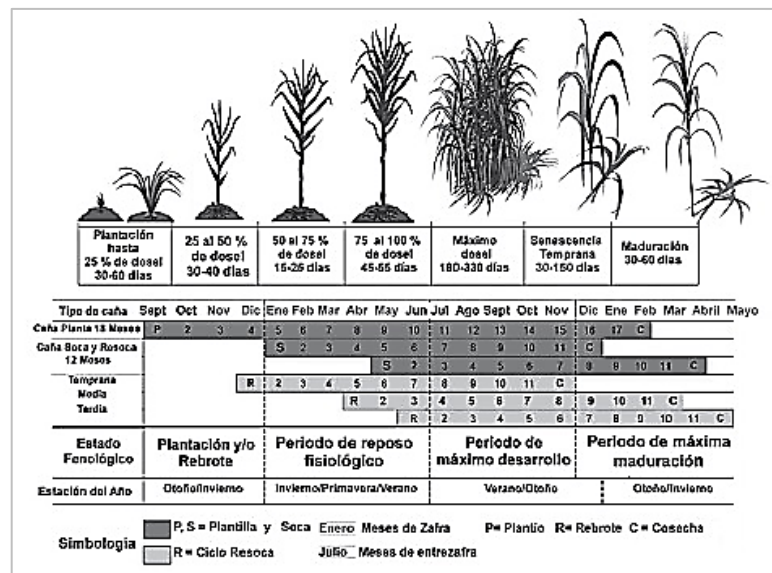
a) La caña de azúcar

Según Edgerton (1958) la caña de azúcar es nativa de las regiones subtropicales y tropicales del sudeste asiático, distribuyéndose por India y Persa, Siria, Palestina, Arabia y Egipto de donde se extendió por todo el continente africano. A finales del siglo XV fue introducida a las islas del Caribe por Cristóbal Colón, donde se obtuvo para ser distribuida en toda América (Peña, 1997). Pertenece al género *Saccharum*, de la familia Poaceae,

orden Poales, clase Liliopsida. El género *Saccharum* corresponde a un complejo constituido por seis especies; cuatro de las cuales son domesticas (*S. officinarum*, *S. edule*, *S. barberi* y *S. sinensis*) y dos silvestres (*S. spontaneum*, *S. robustum*) (Cassalett, Torres, & Isaacs, 1995).

b) Etapas fenológicas

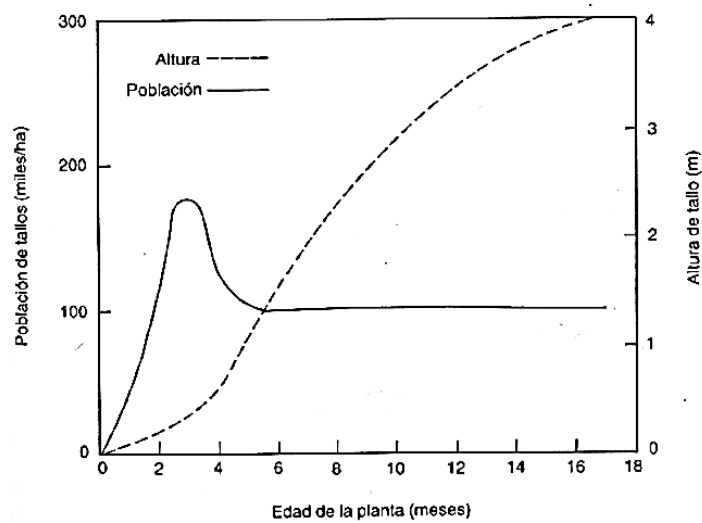
Dentro del ciclo de la caña de azúcar (figura 10) se diferencian cuatro etapas de desarrollo que son: germinación, macollamiento, elongación, y maduración (Ellis & Lankford, 1990). En su desarrollo se consideran esencialmente cuatro fases fenológicas: la fase de establecimiento que implica la germinación y la brotación ya sea en siembra o rebrote (socas), la fase de ahijamiento o macollamiento, la fase de crecimiento rápido o elongación, y la fase de maduración (FAO, 2017).



Fuente: Ramme, 2017

Figura 10. Ciclo fenológico y productivo de la caña de azúcar en el hemisferio norte

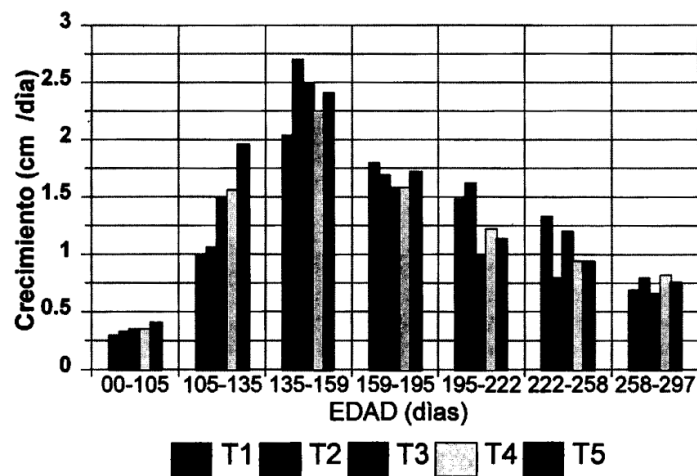
En el valle del río de Cauca, Colombia, el macollamiento se observa a los primeros 3 meses después de la siembra. A partir del quinto mes, el número de tallos por metro lineal se estabiliza, y la tasa de crecimiento aumenta, dando inicio a la etapa de elongación (Cassalett, Torres, & Isaacs, 1995). En Ecuador la edad al corte es de 12 meses. La etapa de germinación y macollamiento está comprendido entre los 3 y 5 meses después de la siembra o corte, la elongación está comprendida entre 5 a 9 meses y la maduración de 9 a 12 meses (Pardo & Proaño, 2008), (figura 11).



Fuente: Cassalet, Torres, & Isaacs, 1995

Figura 11. Dinámica de la población y altura de caña en función de la edad en meses

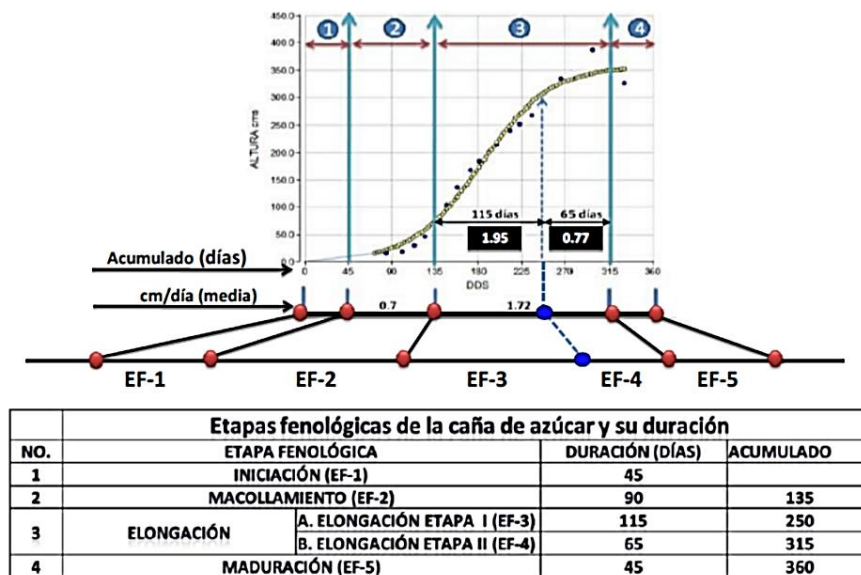
En Guatemala la cosecha se realiza a los 12 meses de edad. La etapa de macollamiento se caracteriza por un aumento notable de la población y un ritmo de crecimiento lento (de entre 0.25 y 0.5 cm/día), esta etapa se alcanza entre 2.5 a 3 meses de edad en el estrato alto y medio, y a una edad menor en el estrato bajo y litoral (figura 12). A partir de los 2.5 a 3 meses la tasa de crecimiento aumenta (hasta 2.5 cm/día) dando inicio a la etapa de elongación, registrando las mayores tasas de crecimiento entre los 90 y 180 días después de la siembra o corte (D.D.S. o D.D.C.) (Juárez & Muñoz, 1998).



Fuente: Juárez & Muñoz, 1998

Figura 12. Tasa de crecimiento en cm/día, Ingenio El Baúl, 1996

Según Castro (2011) en el estrato alto de la franja cañera (a más de 300 m s.n.m.) la iniciación dura 45 días, el macollamiento 90 días, con tasas de crecimiento inferiores a 0.7 cm/día; seguido por la etapa de elongación, etapa de rápido crecimiento, cuya duración es de 180 días presentando tasas de crecimiento de hasta 1.95 cm/día; y la última etapa es de maduración cuya duración es de 45 días (figura 13), sumando 360 días para completar el ciclo productivo, especificando que la duración de estas etapas varía en función de la variedad, el número de cortes y el estrato altitudinal.



Fuente: Castro Loarca, 2011

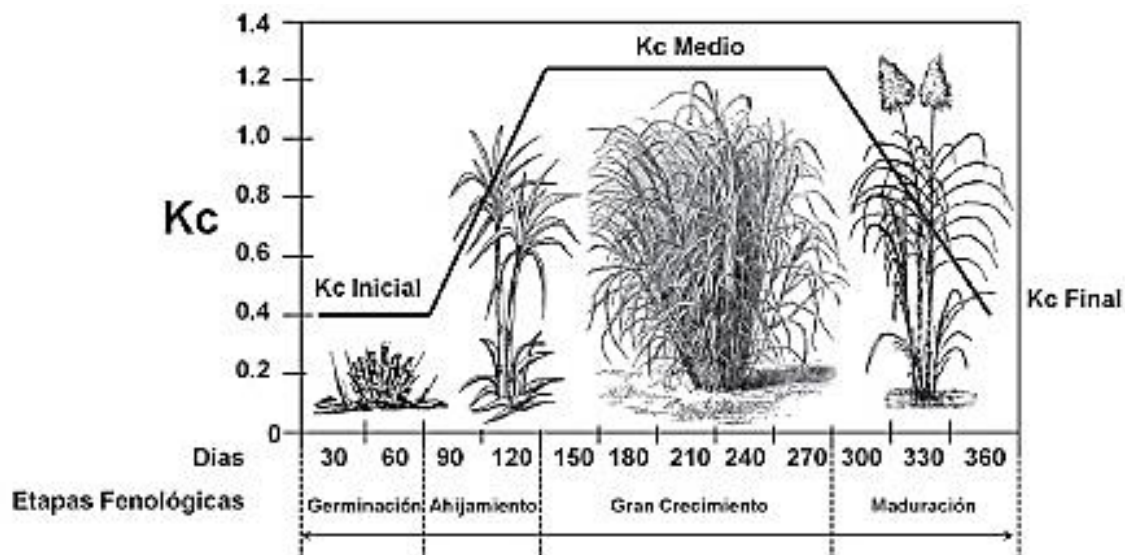
Figura 13. Etapas fenológicas de la caña de azúcar en condiciones del área lisimétrica de estación experimental CENGICAÑA, 1997

c) Coeficiente de consumo de agua K_c

La caña de azúcar consume agua para crecer y desarrollarse, dependiendo de la etapa fenológica en la que se encuentra consume mayor o menor cantidad de agua. Para la estimación del coeficiente del cultivo se compara el consumo de agua del cultivo con el consumo de un cultivo de referencia (pasto). El concepto de cultivo de referencia se introdujo con el fin de obviar la necesidad de definir los parámetros únicos de evaporación para cada cultivo y etapa de crecimiento. De esta forma relacionar la evapotranspiración de cualquier cultivo con la evapotranspiración en la superficie de referencia o cultivo de referencia a través del coeficiente del cultivo. El objetivo del uso del K_c es la determinación de la evapotranspiración real del cultivo. La evapotranspiración real obtenida representa el límite

máximo de evapotranspiración en el cultivo cuando no existen obstáculos de crecimiento de este debido a limitaciones de agua (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

Las diferencias en evaporación y transpiración entre los cultivos de campo y el pasto de referencia pueden ser integradas en un coeficiente único de cultivo (K_c) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006). Este coeficiente oscila entre cero y uno (figura 14). El cálculo de la evapotranspiración del cultivo bajo estas condiciones supone que no existen limitaciones severas por estrés hídrico o salino, densidad del cultivo, plagas y enfermedades, presencia de malezas o baja fertilidad. Debido a las variaciones en las características propias del cultivo durante las diferentes etapas de crecimiento, K_c cambia desde la siembra hasta la cosecha (Gonçalves, 2008). Los efectos combinados, tanto de la transpiración del cultivo, como de la evaporación del suelo, se integran en este coeficiente único del cultivo, de esta forma K_c incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo.



Fuente: Allen, Pereira, Raes & Smith, 2006

Figura 14. Curva generalizada de coeficiente de cultivo K_c

Allen, Pereira, Raes & Smith (2006), Gonçalves (2008), Jiménez et al. (2004), y Doorembos y Kassan (1979) dividen el ciclo vegetativo en varias etapas; entre los 30 a los 60 días después de la siembra (D.D.S.), con una cobertura vegetal de 25 %, recomiendan el uso de un K_c de 0.5, aumentando según aumenta la cobertura vegetal hasta llegar a un 100 % con un K_c aumentando de valor pasando de 0.8, 0.95 y 1.10; entre los 180 y 330, con cobertura

total, recomiendan el uso de un K_c de 1.15. y en la etapa de maduración un K_c de 0.70 (cuadro 8).

Cuadro 8. Coeficiente de cultivo por etapa fenológica para la caña de azúcar

Etapas de desarrollo	Días	Coeficiente de cultura (K_c)
Etapa 1 (siembra a 25% de cobertura del dosel)	30-60	0.50
Etapa 2 (25 a 50% de cobertura del dosel)	30-40	0.80
Etapa 3 (50 a 75% de cobertura de dosel)	15-25	0.95
Etapa 4 (75 a 100% de cobertura del dosel)	45-55	1.10
Etapa 5 (cubrimiento total)	180-330	1.15
Etapa 6 (madurez temprana)	30-150	0.95
Etapa 7 (maduración)	30-60	0.70

Fuente: Allen, Pereira, Raes & Smith, 2006; Gonçalves, 2008; Jiménez et al., 2004; y Doorembos y Kassan, 1979

Juárez y Muñoz (1998) estiman valores de K_c que van de 0.5 a 1.0, para las etapas de iniciación y elongación, respectivamente, reduciéndolo a 0.5 en la etapa de maduración (cuadro 9).

Cuadro 9. Características de los estados fenológicos de la caña de azúcar

Estado fenológico	Duración (días)	K_c	Profundidad radicular (m)
Iniciación	30	0.50	0.40
Macollamiento	60	Variable	Variable
Elongación	Variable	1.00	0.80
Maduración	30	0.50	0.80

Fuente: Juárez y Muñoz, 1998

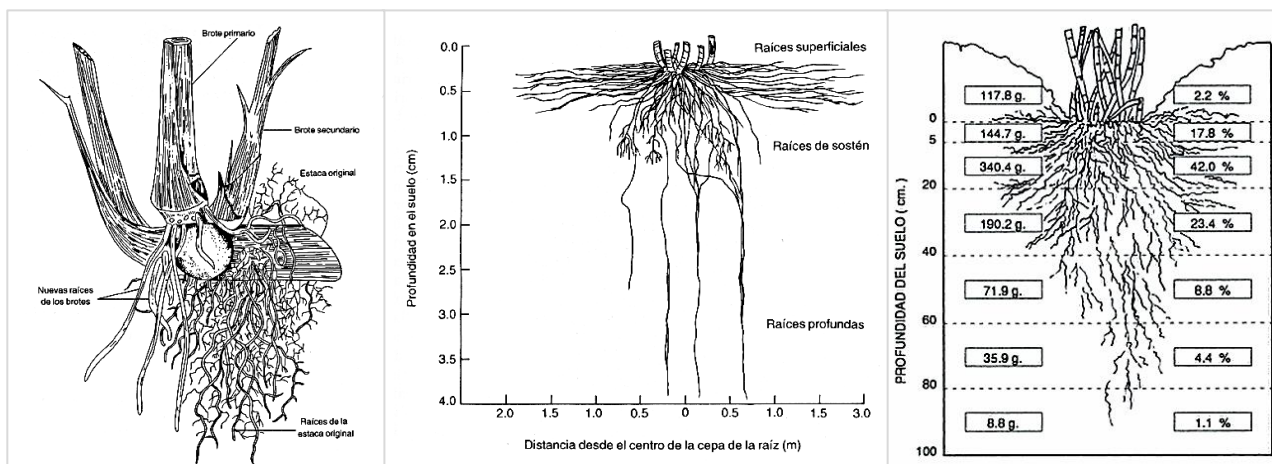
Para la implementación del balance hídrico en el cultivo de caña de azúcar CENICAÑA, usa distintos valores de K_c para estimar la evapotranspiración real, según la etapa fenológica del cultivo. Entre 2 a 4 meses después de la siembra maneja un coeficiente de 0.3; 0.7 para el período de rápido crecimiento comprendido entre los 4 a 10, en este período cuando el nivel freático es alto se emplea un coeficiente de 0.5 para compensar el aporte de agua capilar, y 10 meses después de la siembra se suspende el riego para reducir los niveles de

humedad de los tallos e incrementar la concentración de sacarosa (Cruz, Torres, Besosa, & Rojas, 2010), (Cassalett, Torres, & Isaacs, 1995).

CENGICAÑA hace uso de un coeficiente K_c de 0.3 en la etapa de iniciación, en la etapa de macollamiento trabaja con un valor de 0.6 y para la primera fase de la etapa de elongación 0.9 y la segunda fase 1, en la etapa de maduración no considera ningún valor de K_c ya que durante esta etapa se produce la concentración de azúcar en los tallos y la reducción de humedad facilitando el transporte (Castro O., 2011), (Castro, Osorio, Esquit, López, & López, 2006).

d) Sistema radicular

La función principal del sistema radicular de la caña de azúcar es la de absorber agua y sales minerales, proporcionar anclaje y almacenar materiales de reserva. Presenta dos tipos de raíces, las raíces primordiales que se originan a partir de las bandas de primordios radicales localizadas en el anillo de crecimiento de la estaca sembrada, cuyo período de vida llega hasta que aparecen las raíces de los nuevos brotes, lo que ocurre entre los 2 y 3 meses después de la siembra (figura 15). Las raíces permanentes que aparecen en los anillos de crecimiento radical de los nuevos brotes, estas raíces se caracterizan por ser numerosas, gruesas y de rápido crecimiento.



Fuente: Armaya Estévez, Cock, & Pilar Hernández, 1995.

Figura 15. Planta de caña joven mostrando las dos clases de raíces: primordiales y permanentes

Al evaluar el desarrollo radical de la caña en diferentes edades que variaron desde 4 hasta 19 meses se encontró que el 85 % de las raíces se concentran en los primeros 60 cm profundidad. Las raíces superficiales predominan en los primeros 60 cm de profundidad y su distribución horizontal en el suelo alcanza hasta los 2 m (Armaya Estévez, Cock, & Pilar Hernández, 1995).

Para el diseño de riego CENGICANÑA propone para la etapa de iniciación una profundidad radicular de 20 cm, en la etapa de macollamiento diseñar para 40 cm de profundidad radicular, y para elongación diseñar el riego para una profundidad radicular de 60 cm (Castro O., 2011). Juárez y Muñoz (1998) proponen que para la etapa de iniciación se use una profundidad radicular de 40 cm, y las etapas de elongación y maduración una profundidad radicular de 80 cm, mientras que la etapa de macollamiento pueda variar según las características del cultivo, suelo y meteorología.

iii. Variables meteorológicas

La meteorología es primordial para determinar la evapotranspiración potencial (E_t_o) en una región, que a través de la ecuación $E_t_c = K_c * E_t_o$ se determina la evapotranspiración real del cultivo. A sabiendas que la E_t_o viene dada por el consumo de agua de una superficie de referencia, que en campo se imposibilita implementar, por lo que se han desarrollado modelos como: Thornthwaite, Turc, Penman, Penman-Monteith, entre otros, que estiman la evapotranspiración potencial a través de variables meteorológicas (Almorox, 2017). Por el método usado para la estimación de la E_t_o es necesario conocer los conceptos de:

- a) **Temperatura:** Es una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico. Está relacionada directamente con la parte de la energía interna conocida como energía cinética. A medida que sea mayor la energía cinética de un sistema, se observa que este se encuentra más caliente; es decir, que su temperatura es mayor, las unidades con que se miden son: Grados Celsius, Grados Kelvin, Y Fahrenheit (Yunus, 2009).
- b) **Radiación solar:** Es un flujo de energía que se recibe del sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias. La radiación es medida normalmente por un instrumento denominado piranómetro. La unidad de medida es vatios por metro cuadrado (W/m^2) (Juárez A., 2017).

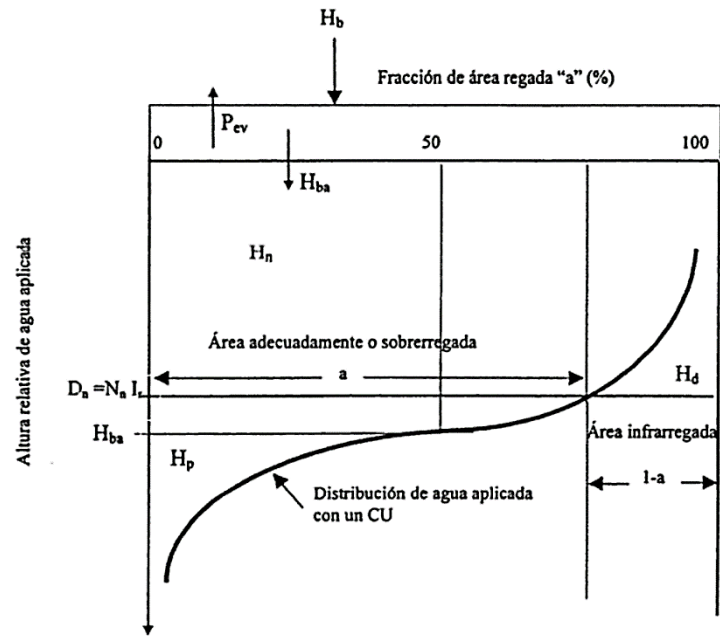
- c) **Humedad Relativa:** Se define como la relación entre la fracción molar de vapor de agua en el aire y la fracción molar del vapor de agua en el aire saturado a la misma temperatura. Esta variable es adimensional, pudiendo explicarse como el tanto por ciento de presión de vapor que tiene el aire respecto de la máxima que puede tener a esa temperatura (Pizzetti, 1991).
- d) **Velocidad del viento:** La velocidad del viento es medida por el anemómetro, las unidades en las que se mide son Nudos y Km/hora, Beaufort en el siglo XIX creó una escala para las velocidades de viento, siendo la escala cero la denominación Calma con velocidades de viento que no superan 1.9 km/h, y la escala más alta es la 12, cuya denominación es Huracán con velocidades de viento que superan los 119 km/h (Inet, 2017).
- e) **Precipitación pluvial:** Se mide en mm y es cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre, los equipos para medir la precipitación son los pluviómetros y los pluviógrafos, siendo estos últimos capaces de determinar la duración y la intensidad de las lluvias (Pierre Gourou, 1970).

b. Entradas de agua al sistema

El balance hídrico considera al suelo como un sistema o estructura porosa donde se almacena el agua, y para estimar el contenido de agua que este posee es necesario conocer y cuantificar todas las entradas y salidas de agua existentes en esta (Castro O. R., 2005). Los aportes de agua al sistema se dan por lluvia, principalmente en la época lluviosa, cuya intensidad y duración no pueden ser modificadas por el hombre (Torres J., 1995). El riego es aplicado en la época seca, o canícula, para suplir los requerimientos hídricos del cultivo, la intensidad y duración de este pueden modificados para adaptarlo a la velocidad de infiltración y capacidad de retención de agua del suelo (Castro O., 2011). Para estimar la intensidad del riego, la lámina de agua aplicada, y la distribución espacial de esta en la parcela por evento se realizan pruebas de uniformidad de riego (Montero, 2000).

i. Pruebas de uniformidad de riego

La uniformidad del riego indica el grado de igualdad de dosis recibida por los diferentes puntos de la parcela. En riego por aspersión está muy extendida la utilización del Coeficiente de uniformidad de Christiansen (1942) (figura 16) (Montero, 2000).



Fuente: Tarjuelo, J. (1995).

Figura 16. Esquema de distribución del agua en un sistema de riego por aspersión

Para calcular el coeficiente de uniformidad de riego se debe seleccionar un sector o área de riego representativo de todo el sistema (figura 17). Según topografía, tipo de suelo, condición de la planta, etc. Del sector se eligen 2 aspersores en el cual se distribuye una red de recipientes entre los aspersores, abarcando el área de mojado de los aspersores hasta el punto de intersección con el siguiente lateral. Los recipientes se distribuyen en el área antes del riego, y una vez terminado se colecta y mide la cantidad de agua, acumulada en cada recipiente (Villaviciencio & Villablanca, 2010).

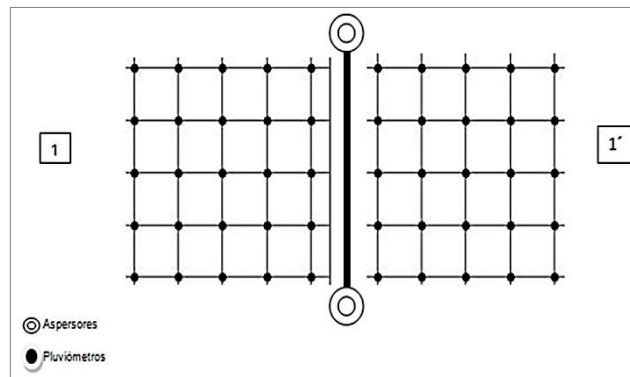


Figura 17. Distribución de recipientes recolectores durante una prueba de uniformidad de riego en el sistema de riego por aspersión

De la prueba de uniformidad de riego se calcula la lámina neta aplicada durante el evento de riego, el coeficiente de uniformidad, la uniformidad de distribución, el porcentaje de traslape entre los aspersores, y la intensidad de riego, entre otros parámetros de funcionamiento del riego (Castro, Tuchan, & Tuyún, 2012).

ii. Aporte capilar

La capilaridad es un fenómeno debido a la tensión superficial, en virtud de la cual un líquido asciende entre láminas muy próximas y por tubos de pequeño diámetro, este ascenso es inversamente proporcional al diámetro de estos. Se produce debido a la diferencia entre las fuerzas de cohesión del líquido y la adhesión a las moléculas del tubo capilar, deteniéndose cuando la tensión superficial es equilibrada por el peso del líquido que llena el tubo (Manilla, Valdez, Gamica, & Martínez, 2017).

El mismo fenómeno se produce en el suelo cuando el agua asciende entre sus poros, la altura que alcanza el agua por efecto de la capilaridad en el suelo se determina considerando una masa de suelo con espacios capilares formados por los vacíos existentes en su masa. A diferencia de los tubos capilares, los vacíos en el suelo presentan diámetros de distintos tamaños, comunicándose entre sí hasta formar una red de espacios porosos. Al tener contacto con la capa freática los espacios vacíos empiezan a saturarse. El agua capilar ocupa los microporos, manteniéndose en el suelo gracias a la tensión superficial. Para que este fenómeno ocurra el suelo debe tener textura fina, de tal manera que los poros que haya entre las partes solidas del suelo sean tan pequeños como un tubo capilar (Benítez, 1972).

El aporte capilar proveniente de la capa freática es considerado una entrada de agua sin costo, al igual que la lluvia, lo que hace que su cuantificación sea un factor importante para el ahorro de agua en la temporada de riego, minimizando costos de energía y mano de obra (Castro, Pinzón, & Montufar, 2016).

Dependiendo de la textura del suelo la elevación capilar varía, en arena gruesa llega de 2 cm a 5 cm de altura, en arena 12 cm a 35 cm, arena fina 35 cm a 70 cm, limo 70 cm a 150 cm, y arcilla 200 cm a 400 cm (Benítez, 1972). Torres, (1995) y (2016), menciona que el aporte capilar se aprecia fisiológicamente cuando el nivel freático se encuentra entre 1 m y

1.2 m, incluso hasta 3.5 m. A profundidades superiores a los 4 m, el aporte capilar se es imperceptible.

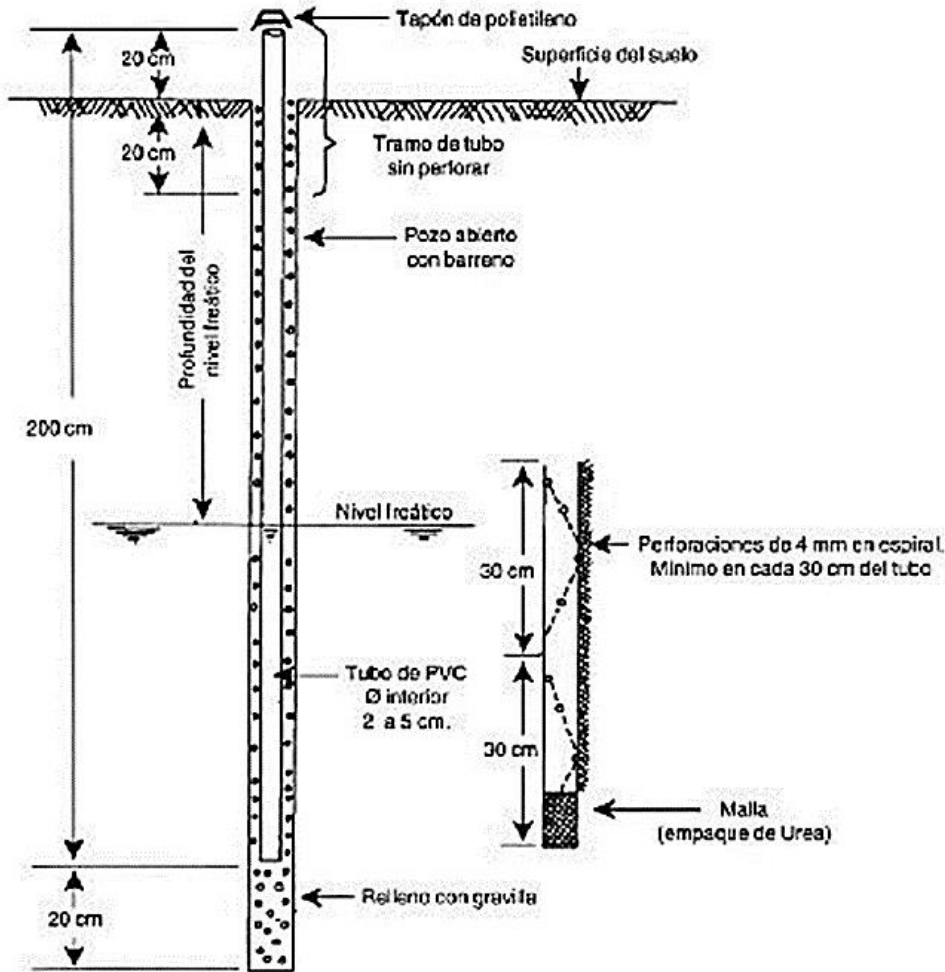
Allen, Pereira, Raes & Smith (2006) mencionan que flujos como el subsuperficial, la percolación profunda y la capilaridad son difíciles de medir por lo que para estudios de corto período no se consideran. Sin embargo, en un balance hídrico dinámico que dura lo que dura el ciclo fenológico del cultivo es necesario tomarlo cuantificarlo (Torres J., 1995).

Hillel, (2004) comenta de la dificultad para desarrollar un modelo preciso para estimar el aporte capilar, por la complejidad de la forma y tamaño de los poros en el suelo y por la implicación de ecuaciones como la de Darcy para flujo no saturado. A nivel agrícola Torres (1995) y Castro (2011) hablan de la importancia que tiene el monitoreo del nivel freático para conocer y desarrollar modelos empíricos basados en esta variable para estimar el aporte de agua capilar a la zona radicular.

a) **Tubos piezométricos**

La ecuación del balance hídrico contempla el aporte de agua por capilaridad a partir del nivel freático. Torres (1995), indica que esto es pertinente siempre que el nivel freático se encuentre localizado entre 1 m a 1.2 m de profundidad. El nivel freático en un punto varía con respecto a las variaciones de precipitación, presión atmosférica y con las mareas (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006). Por lo que se hace necesario la construcción de pozos que permitan observar el nivel del agua durante el desarrollo del cultivo.

Los niveles piezométricos del agua subterránea se miden con pozos o piezómetros, teniendo en cuenta la topografía y las estructuras geológicas de los acuíferos (figura 18) (Sokolov & Chapman, 1981). El nivel freático depende de la precipitación, y cuando este nivel está a más de 1.2 m de profundidad durante 25 días o más, y en tal periodo no ocurren lluvias apreciables se hace necesario la aplicación del riego. Un pozo de observación se puede construir de una sección de tubo PVC de 1.5 m a 2 m de longitud y de 2.5 cm a 3 cm de diámetro perforado con agujeros de 2 mm a 3 mm (Torres J., 1995) (Torres J., 2016).



Fuente: Torres J., 2016

Figura 18. Diseño e instalación de tubo piezométrico en campo

La distribución de la red de puntos de observación en la zona de estudio debe corresponderse con la topografía, con las condiciones hidrogeológicas y con la distribución del agua recogida en los drenes y en la red de riego (Sokolov & Chapman, 1981).

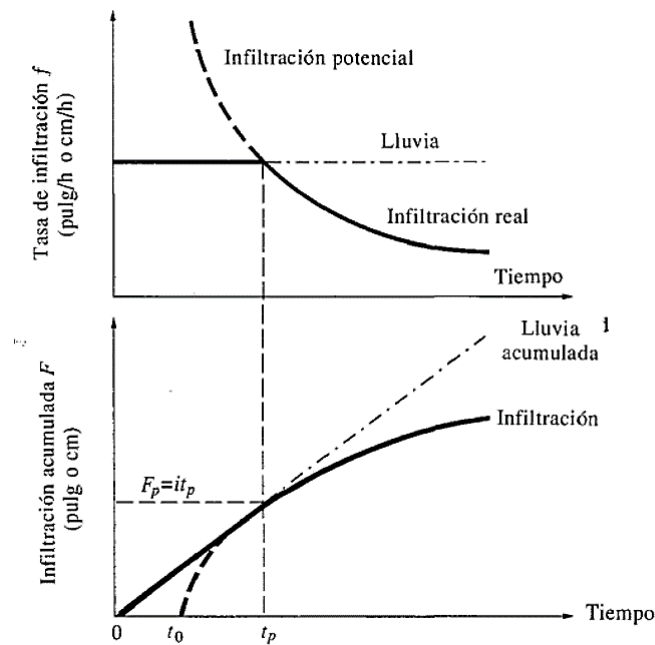
c. Salidas de agua del sistema

El balance hídrico contempla dentro de las salidas de agua la percolación profunda y la evapotranspiración. La escorrentía se produce cuando la capacidad de absorción del suelo es superada por la intensidad de las lluvias o el riego, por lo que no se considera como parte del balance de agua dentro del suelo, ya que es un fenómeno ocurrido fuera del sistema suelo-planta.

i. Escorrentía

La escorrentía es el agua generada en forma de flujo superficial, este fluye sobre la superficie del terreno hasta el cauce más cercano, producido únicamente en un evento de lluvia o riego, cuando la intensidad es superior a la tasa de infiltración, se produce un almacenamiento superficial que primero llena las depresiones del terreno conformando el almacenamiento de retención. Luego que la depresión se haya llenado se inicia el almacenamiento de detención, el cual genera el escurrimiento o escorrentía. Esto indica que la escorrentía no solo depende de la infiltración sino también del micro relieve del terreno. La tasa de escurrimiento dependerá del volumen de almacenamiento de detención y de la pendiente y rugosidad del terreno (Orozco, 2009).

La precipitación produce la escorrentía, sin embargo, nunca toda el agua precipitada produce escorrentía. El proceso es complicado y requiere de métodos específicos para ser calculado. Un ejemplo es que en un área específica precipita lluvia a una intensidad constante. Al inicio de la lluvia, la mayor parte queda retenida en la vegetación y la superficie, cuando se superan las pérdidas iniciales la lluvia inicia a infiltrarse, con el tiempo la capacidad de infiltración del suelo se reduce, lo que irá produciendo la escorrentía superficial (figura 19) (Orozco, 2009).



Fuente: Ven Te Chow, 1994

Figura 19. Relación lluvia e infiltración para determinación de tiempo de encharcamiento

ii. Percolación profunda

La percolación profunda, al igual que el flujo subsuperficial y el aporte capilar, es difícil de medir, aunque puede desprejarse en periodos de corto tiempo. Después de la ocurrencia de una lluvia intensa o riego, el contenido de humedad en la superficie del suelo puede exceder el valor de la capacidad de campo. En el balance hídrico se asume que esta pérdida se produce el mismo día de la precipitación o riego, por lo que se considera la capacidad de campo la cantidad máxima de agua que el suelo retiene (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

La percolación profunda se produce por la pérdida de agua que llena la macro porosidad del suelo, conocida como la humedad o agua gravitacional. Cuando la cantidad de agua aplicada es mayor a la capacidad de retención, el agua percola hacia zonas en las que las raíces del cultivo no pueden acceder, siendo por lo tanto agua perdida (Laserna, 2017).

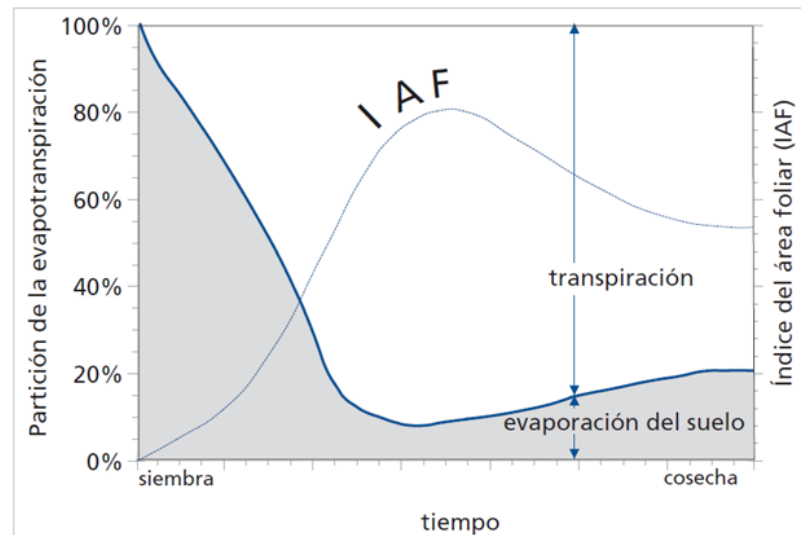
iii. Evapotranspiración

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por la evaporación del agua en el suelo y a través de la planta por transpiración (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante, la cual puede ser un lago, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada. El cambio de estado de las moléculas del agua de líquido a vapor requiere energía. La radiación solar directa y, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía. Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponible en la superficie evaporante son otros factores que afectan el proceso de la evaporación (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de las estomas. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmosfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. La

transpiración, al igual que la evaporación, depende del aporte de energía, de la gradiente de presión del vapor y la velocidad del viento (figura 20). Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados para su determinación (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).



Fuente: Pereira, Raes, & Smith, 2006

Figura 20. Evaporación y transpiración durante el desarrollo del cultivo

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación, con el desarrollo del cultivo se cubre la totalidad del suelo, convirtiéndose la transpiración en el proceso principal. La evapotranspiración incluye dos diferentes definiciones necesarias conocer para el entendimiento del balance hídrico: evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{to}), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

La evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{to}) es la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, la superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. Un cultivo hipotético de referencia presentaría una altura de 0.12 m, una resistencia superficial de 70 $s\ m^{-1}$ y un albedo de 0.23. La superficie de referencia se asemeja a una superficie extensa

de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente, sombreando totalmente la tierra y con un aporte adecuado de agua (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre la evapotranspiración, los únicos factores que afectan la E_t son los parámetros climáticos. Por lo tanto, es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. La E_t expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año, sin considerar las características del cultivo y las características del suelo (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006) (Castillo, Castellví, Bosch, Cusidó, & Sánchez, 2001).

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (E_{tc}) se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo condiciones óptimas de suelo y agua. La E_t y E_{tc} generalmente no son iguales, por lo que existe un coeficiente que relaciona ambos, conocido como coeficiente del cultivo (K_c) y se utiliza para calcular la E_{tc} a partir de la E_t (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

La diferencia en la anatomía de las hojas, características de los estomas, las propiedades aerodinámicas, e incluso el albedo, ocasionan que la evapotranspiración del cultivo difiera de la evapotranspiración del cultivo de referencia bajo las mismas condiciones climáticas. Debido a variaciones en las características del cultivo durante los diferentes períodos de crecimiento, para un determinado cultivo, K_c cambia desde la siembra hasta la cosecha (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

La evapotranspiración de referencia (E_{to}) puede ser calculada a través de distintos métodos como: Holdridge, SCS Blaney-Criddle, Christiansen pan, Budyko, Ivanov, Lorry y Jhonson, Papadakis, Thornthwaite, Linacre, Makkink, Turc, Harvgreaves, Christiansen y Penman. Cada método está desarrollado para requerir menor o mayor cantidad de información meteorológica para funcionar. Por lo que, según la cantidad de información que se tenga del área de estudio así se podrá elegir el método a utilizar, cabe mencionar que entre más variables meteorológicas se usen, la información a obtener será más precisa (Pérez, 1992).

El 26 de mayo de 2000, el panel de expertos de la FAO publicó el documento número 56 titulado “Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” (Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements), donde se recomienda la adopción del método combinado de Penman-Monteith. Esta propuesta fue validada y aceptada por la comunidad científica mundial (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006). Las variables meteorológicas que requiere este método son: radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad de viento.

a) Ecuación de FAO Penman-Monteith

En 1948 Penman combinó el balance energético con el método de la transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de horas sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento, cuya ecuación es:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a * C_p * \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

Donde R_n es la radiación neta, G es el flujo del calor en el suelo, $(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión de vapor del aire, ρ_a es la densidad del aire a presión constante, c_p es el calor específico del aire, Δ representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, γ es la constante psicrométrica, y r_s y r_a son las resistencias superficial y aerodinámica.

La resistencia aerodinámica y superficial son datos no medibles pero fáciles de calcular. La transferencia de calor y de vapor de agua de la superficie de la planta hacia el aire es determinada por la resistencia aerodinámica:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{om}} \right] * \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{K^2 * U_z}$$

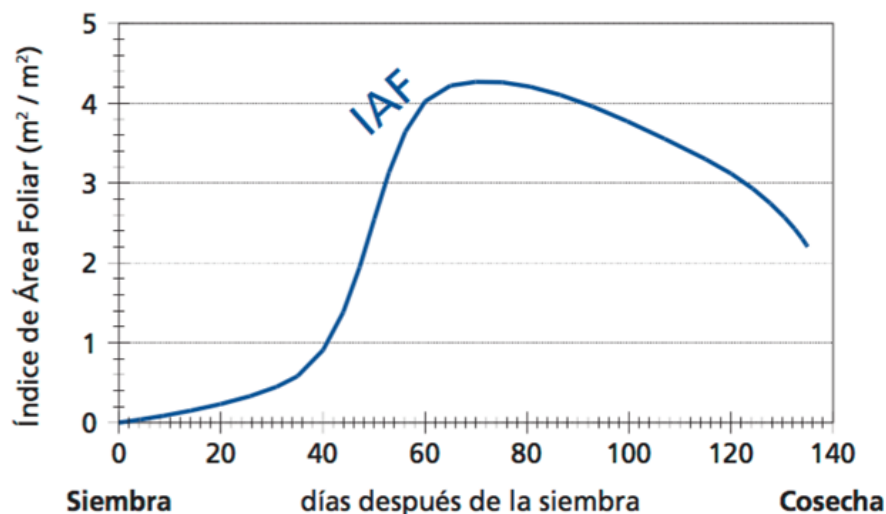
Donde r_a representa la resistencia aerodinámica, en s/m; z_m es la altura de medición del viento en metros, z_h es la altura de medición de humedad en metros, d es el plano de altura de desplazamiento cero en metros, z_{om} es la longitud de rugosidad que gobierna la transferencia de momentum dada en metros, z_{oh} es la longitud de rugosidad que gobierna la transferencia de calor y vapor de agua en metros, k es la constante de Von Karman, 0.41

(-); y U_z es la velocidad del viento a la altura z dada en metros por segundo (m/s) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

La resistencia superficial total describe la resistencia al flujo de vapor a través del cultivo transpirante y de la superficie evaporante de suelo, si la vegetación no cubre completamente el suelo. Si el cultivo no transpira de manera potencial, la resistencia también depende del estado del agua dentro de la planta. Una aproximación aceptable de una relación compleja de la resistencia superficial de una vegetación densa que cubre completamente el suelo es:

$$r_s = \frac{r_1}{IAF_{activo}}$$

Donde r_s es la resistencia superficial (total) en segundos por metro (s/m); r_1 es la resistencia estomática total de una hoja bien iluminada en s/m, y IAF_{activo} es el índice activo de área foliar en m^2 (área de la hoja) sobre m^2 (superficie del suelo). El IAF es una cantidad adimensional que presenta el área de la hoja por unidad de área de suelo debajo de ella (figura 21). El IAF_{activo} es el índice del área foliar que contribuye activamente en la transferencia superficial de calor y vapor. Los valores de IAF para los diferentes cultivos difieren grandemente, pero valores de 3 a 5 son comunes para muchos cultivos desarrollados. El IAF cambia a lo largo del período de crecimiento y alcanza normalmente su máximo valor antes o en la floración (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).



Fuente: Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006

Figura 21. Representación típica de la variación de índice de Área Foliar (IAF) a lo largo del periodo de crecimiento de un cultivo de maíz

El enfoque de Penman-Monteith incluye los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y el flujo de calor de grandes extensiones uniformes de vegetación. La mayoría de los parámetros encontrados en el modelo son medidos o pueden calcularse usando datos meteorológicos. Esta ecuación permite calcular la evapotranspiración para cualquier cultivo pues las resistencias superficiales y aerodinámicas son específicas para cada cultivo (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

En 1990 un panel de expertos e investigadores en riego fue organizado por la FAO, en colaboración con la Comisión Internacional para el Riego y Drenaje y con la Organización Meteorológica Mundial con el fin de revisar las metodologías para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos. El panel de expertos recomendó la adopción del método combinado de Penman-Monteith como nuevo método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

El método FAO Penman-Monteith se desarrolló haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura de 12 cm, con una resistencia superficial de 70 s m^{-1} y un albedo de 0.23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme y creciendo activamente y adecuadamente regado. Este método para estimar la evapotranspiración potencial se basa en la ecuación original de Penman-Monteith y la ecuación de la resistencia aerodinámica y la ecuación de resistencia superficial, obteniendo el modelo siguiente:

$$Et_0 = \frac{0.408 * \Delta(R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 * u_2)}$$

Donde E_{t_0} es la evapotranspiración de referencia en mm/día, R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo en $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{día}$, R_a es la radiación extraterrestre en $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{día}$, G representa el flujo de calor de suelo en $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{día}$, T es la temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$), u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m/s), e_s equivale a la presión de vapor de saturación en kPa, e_a la presión real de vapor (kPa), $(e_s - e_a)$ es el déficit de presión de vapor en kPa, Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor en $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$, y γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Para asegurar la precisión del cálculo, los datos deben ser medidos a 2 m de altura, sobre una superficie extensa de pasto verde, cubriendo completamente el suelo y sin limitaciones de agua (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

En el documento N° 24 de la Serie FAO Riego y Drenaje «Necesidades de agua de los cultivos» se presentaron cuatro métodos para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia: Blaney-Criddle, radiación, Penman modificado y el método del tanque de evaporación. En este documento la FAO describe que el método de Penman modificado ofrecía los mejores resultados con el mínimo de error posible con relación a un cultivo de referencia (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

Varios estudios realizados por el Comité de Requerimientos de Agua para Riego de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en ingles) y la Comunidad europea han demostrado que el método de Penman modificado con frecuencia sobreestima la evapotranspiración potencial hasta 20 % para condiciones evaporativas bajas, sin embargo, ambos equipos de investigación concluyen que es el método que produce resultados relativamente exactos y consistentes tanto en climas áridos como en húmedos. No se puede esperar que ninguna ecuación formulada para el cálculo de la evapotranspiración y basada en datos climáticos, determine la evapotranspiración perfectamente. Esto debido a la simplificación en la formulación y los errores en la recopilación de los datos climáticos (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

D. Sondas FDR para monitoreo de humedad

El balance hídrico estima la humedad del suelo tomando en cuenta todos los factores que influyen sobre la dinámica del agua en este. Con el avance de la tecnología se ha facilitado la mayoría de los cálculos que involucran su ecuación. Sin embargo, existe siempre un grado de incertidumbre que aconseja realizar sondeos periódicos para reajustar los balances producidos en la estimación del consumo de agua, ya el suelo presenta variabilidad espacial (Berengena, Puech, & Gavilán, 2007).

Castro (2017), enfatiza que es necesario llevar a cabo la verificación in situ del contenido de humedad en el suelo, a través de sondas TDR o FDR, al usar el balance hídrico como

herramienta para estimar el contenido de humedad por lote, específicamente en áreas críticas con aporte capilar o suelos de textura arenosa o con presencia de areneras.

Una sonda FDR (Frequency Domain Reflectometry) basa su funcionamiento en la relación existente entre el contenido de agua del suelo y la constante dieléctrica. Esta consiste en un sistema de sensores de capacitancia eléctrica que miden el contenido volumétrico del agua en el suelo a diferentes profundidades (Diestre, 2017). El principio utilizado para estimar la humedad se basa en la medida de la constante dieléctrica compuesta del suelo mediante electrodos (placas paralelas o anillos metálicos). La constante dieléctrica, también conocida como permisividad eléctrica que es una propiedad macroscópica de un medio, en este caso el suelo, relacionado con la permisividad eléctrica que tiene (Alonso & Finn, 1971).

El agua es uno de los solventes más polares que existen, esto se debe a la presencia de un átomo muy electronegativo, el Oxígeno, y dos muy poco electronegativos, los Hidrógenos en la molécula, lo que la convierte en uno de los líquidos con mayor constante dieléctrica de la naturaleza (Vásquez, 2017). Cuando aumenta el contenido de humedad en el suelo, la constante dieléctrica también lo hace. En el cuadro 10 se presentan las constantes dieléctricas de algunos compuestos químicos más comunes, entre ellos el agua.

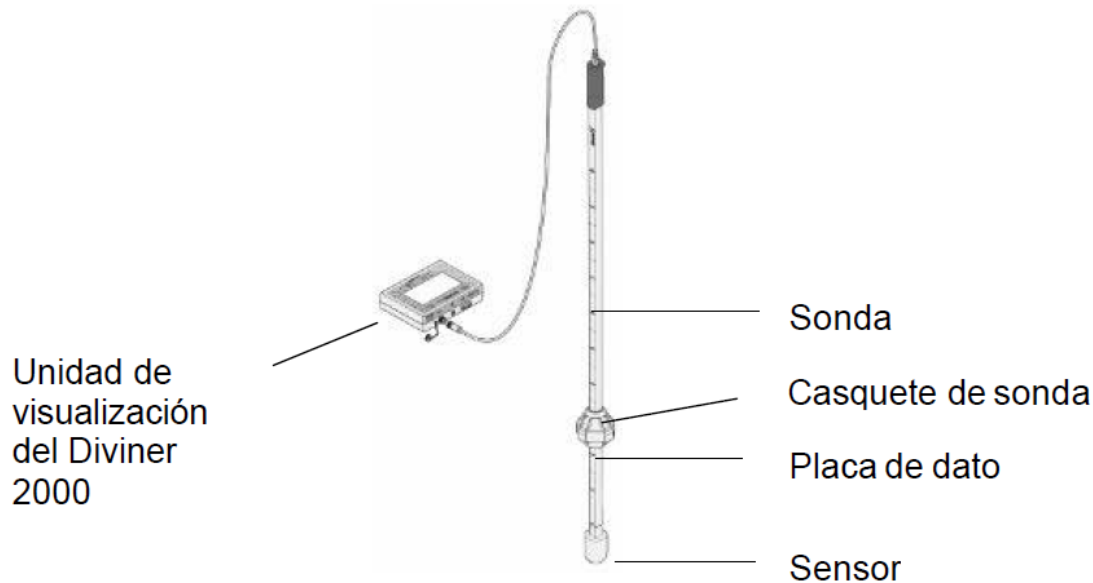
Cuadro 10. Constante dieléctrica de algunos compuestos químicos

Compuesto	H ₂ O	Metanol	Etanol	H ₂ S	C ₆ H ₆	CCl ₄	CH ₄	Aire	Poliestireno
Constante dieléctrica (€)	78.50	32.60	24.00	9.30	2.20	2.20	1.70	1.00	2.50

Fuente: Vásquez (2017)

La sonda FDR crea un campo eléctrico de alta frecuencia, emitido por sensores en un tubo de acceso de PVC instalados en el suelo, esta frecuencia se modifica dependiendo del contenido de agua y aire en el suelo, lo que se extrapola a un valor volumétrico de lámina de agua en milímetros para cada 10 cm de suelo. Es una tecnología no radioactiva con una exactitud mayor que 1 % del contenido volumétrico de agua en el suelo, cuando es debidamente calibrada (Ruiz, 2010).

El equipo de medición está constituido por varios componentes entre los cuales destaca la unidad de visualización de datos, la sonda, el casquete, una placa de datos y el sensor de humedad (figura 22). La sonda portátil mide el contenido de humedad en el suelo a cada 10 cm a través del perfil del suelo. Los indicadores se leen a través de la pared de un tubo de acceso con graduaciones, hecho de PVC. La sonda consiste en una varilla de metal con un casquete de sonda y un sensor en la parte inferior. Esta sonda tiene una influencia que se extiende horizontalmente a 10 cm en el suelo, medidos desde el exterior del tubo, y su alcance vertical es de unos 5 cm, medidos desde el centro del sensor (Berengena, Puech, & Gavilán, 2007).



Fuente: Sentek (2003)

Figura 22. Componentes de la sonda de capacitancia FDR de Sentek®

Cuando las marcas de medición en la sonda están alineadas con la parte del casquete, muestran la profundidad de la inserción de la sonda en el suelo. Las marcas de medición se indican en centímetros de un lado y en pulgadas del otro lado. La sonda registra las lecturas automáticamente cada 10 cm de profundidad. Por tanto, una sonda de 0.7 m registra lecturas en 7 horizontes de profundidad (Sentek, 2003).

Al tratarse de un sistema cuyas propiedades son cambiantes en el tiempo, la señal de las sondas se ve afectada por factores muy diversos independientes del contenido de humedad (García, Jiménez, Muriel, Perea, & Vanderlinden, 2005).

Quezada et al. (2013), concluye que la textura tiene incidencia en la precisión de la sonda, adjudicándolo al efecto de la porosidad del suelo sobre la velocidad de la onda electromagnética. Las mediciones de humedad no entregan un buen ajuste cuando se usan con la calibración de fábrica, siendo necesario mejorar su precisión con calibración por sitio específico en un amplio rango de contenido de agua del suelo. Berengena et al. (2007), obtuvo una sobreestimación de 3.42 % en la estimación de la evapotranspiración usando sondas FDR, con 2.1 % del error cuadrático debido a la aleatoriedad, concluyendo que en estos equipos el componente aleatoriedad tiene mayor peso que el sistemático, este último debido a la falta de calibración específica para el suelo, indicando que con un ajuste en la ecuación de calibración la precisión del equipo mejoraría.

2.2.2 Marco Referencial

A. Ubicación geográfica de localidades

El proyecto se estableció en 3 localidades del ingenio ubicadas en las fincas Agrícola del Sur, ubicada en las coordenadas geográficas -90.837305° y 14.245848° , La Prosperidad, ubicada en las coordenadas -90.818832° y 14.060819° , y California, ubicada en las coordenadas -90.643255° y 14.066889° .

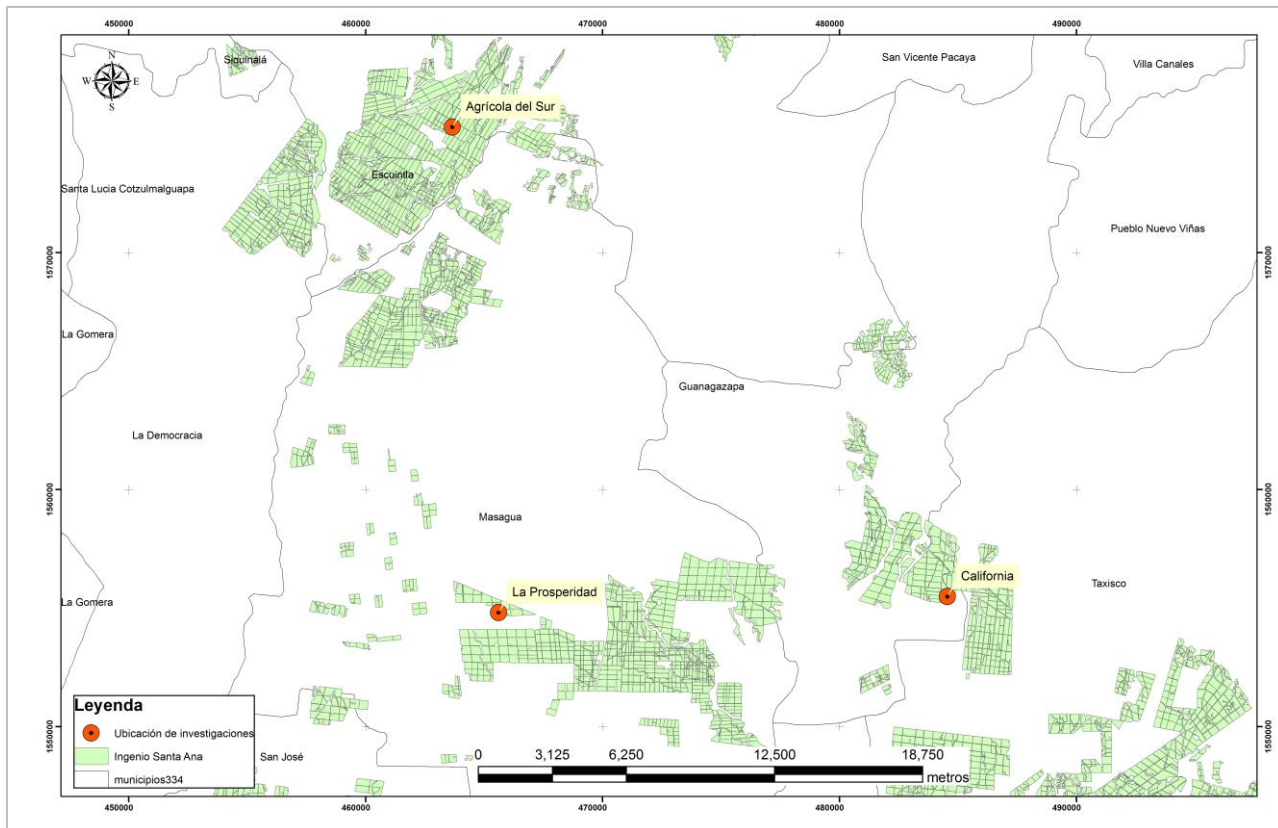


Figura 23. Ubicación geográfica de localidades estudiadas

Finca Agrícola del Sur se ubica en el municipio de Escuintla, finca La prosperidad se ubica dentro del municipio de Masagua y finca California se ubica en el municipio de Guanagazapa, las tres fincas se encuentran dentro del municipio de Escuintla. En el cuadro 11 se detallan las características básicas de los pantes donde se estableció la investigación.

Cuadro 11. Características generales de localidades estudiadas

Región	Finca	Lote	Altitud (m)	Área (ha)
6	Agrícola del Sur	521	164.4	8.72
3	La Prosperidad	14	28.57	9.58
5	California	221A	19.12	10.25

B. Influencia de estaciones meteorológicas del ICC sobre localidades

La influencia de las estaciones meteorológicas del ICC en las localidades se determinó a través un polígono de Thiessen (figura 24), determinando que la estación Costa Brava, que se ubica en las coordenadas -90.920738° y 14.237773° a 144 m s.n.m., tiene influencia sobre la finca Agrícola del Sur, localidad uno; la estación Amazonas, ubicada en las coordenadas -90.769984° y 14.066614° a 28 m s.n.m., tiene influencia sobre la finca La Prosperidad, ubicación de la localidad dos, y la estación San Rafael, con coordenadas -90.63° y 14.02° a 10 m s.n.m. tiene influencia sobre la finca California, tercera localidad.

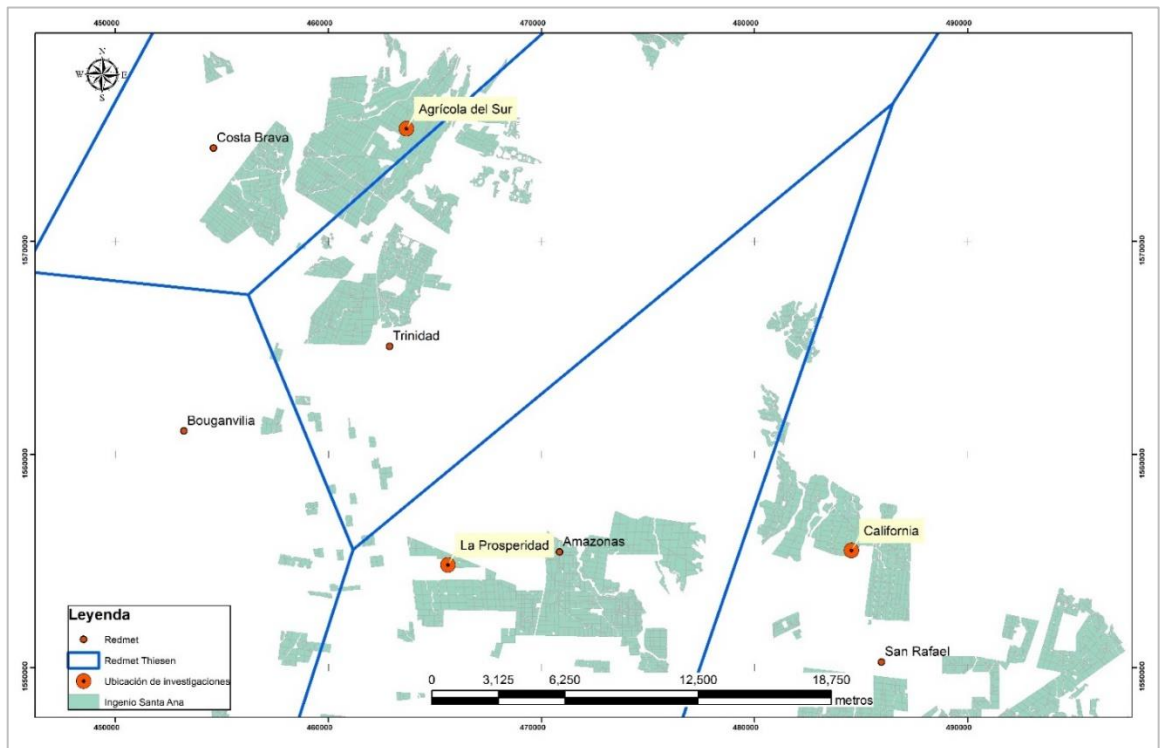


Figura 24. Influencia de las estaciones meteorológicas del ICC sobre las localidades evaluadas

C. Localidad 1: Agrícola del Sur

La primera localidad se ubicó en la finca Agrícola del Sur, en el lote 521, (figura 25). Presenta una extensión de 8.72 ha, a una altitud media de 164.4 m s.n.m., situándolo en el estrato medio, según la clasificación estratigráfica de CENGICAÑA. En el lote se sembró caña de la variedad CG-9846, el 24 de diciembre de 2015, a un distanciamiento de siembra de 1.5 m.



Fuente: Google Earth®, 2016

Figura 25. Ubicación del lote 521 de finca Agrícola del Sur

a. Características climáticas

De los ocho años de registro de la estación pluviométrica ubicada en la finca se determinó que en la localidad precipita por año un promedio de 2,901.8 mm de lluvia, siendo 2010 el año de mayor precipitación con 3,707.54 mm de lluvia, tal como se observa en la figura 26.

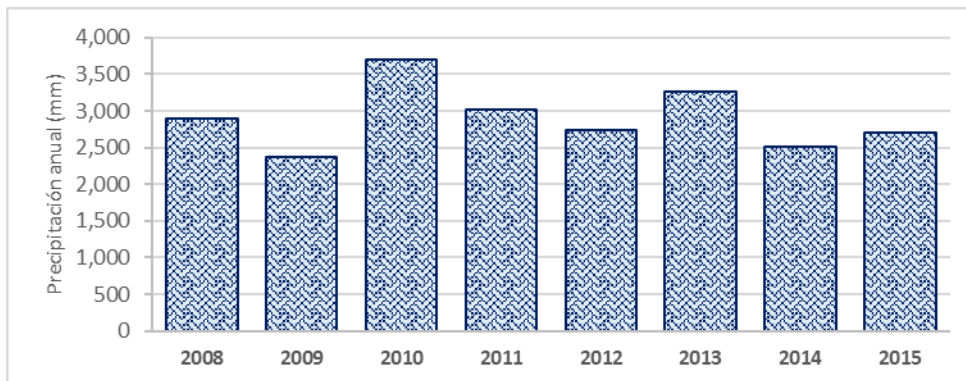


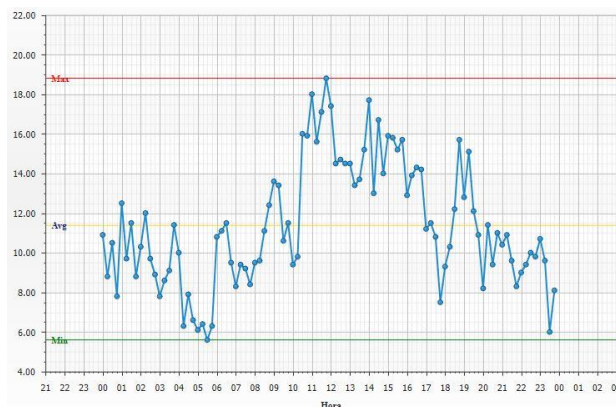
Figura 26. Precipitación anual en finca Agrícola del Sur

De la evapotranspiración potencial calculada con datos diarios de la estación meteorológica Costa Brava, por el método de Penman-Monteith, a través de una hoja de cálculo de Excel® (cuadro 12), se estimó que el 48 % del tiempo la Eto en la localidad es inferior a 4.5 mm/día, el 77 % del tiempo la Eto es inferior a 5 mm/día y el 99 % del tiempo la Eto es inferior a 6 mm/día.

Cuadro 12. Evapotranspiración potencial en finca Agrícola del Sur (2014 - 2016)

ETO	Frecuencia	Frecuencia porcentual	Frecuencia acumulada
2.5	0	0%	
3	1	0%	0%
3.5	9	2%	3%
4	60	16%	19%
4.5	105	29%	48%
5	106	29%	77%
5.5	72	20%	96%
6	10	3%	99%
6.5	2	1%	100%
7	1	0%	100%
TOTAL	366	100%	100%

De los tres años analizados se determinó que la máxima evapotranspiración potencial estimada se obtuvo el 9 de febrero de 2016 (figura 27), con una Eto de 6.6 mm/día; al analizarse la información se determinó que la temperatura media de ese día fue de 27.8 °C, con una mínima de 23.4 °C y una máxima de 34.6 °C, obteniendo una radiación de 22,868.6 W/m², con humedad relativa de 25 % a 46 %, siendo la media de 35 %, con velocidades de viento que llegaron hasta 18.8 km/h, manteniéndose durante todo el día con velocidades superiores a 5.6 km/h, presentando una media de 11.5 km/h.



Fuente: Redmet-ICC, 2016

Figura 27. Velocidades de viento (en km/h) registradas en la estación Costa Brava en fecha 9 de febrero de 2016.

b. Características edáficas

La localidad uno, ubicada en el lote 521, presenta suelos de textura franco arenosa, evaluado hasta una profundidad de 60 cm (figura 28). Su capacidad de campo se encuentra a 38.41 % de humedad, con punto de marchitez permanente de 22.32 %, y densidad aparente de 0.86 g/cm³.



Figura 28. Calicata realizada en finca Agrícola del Sur

D. Localidad 2: La Prosperidad

La segunda localidad fue ubicada en finca La Prosperidad, en el lote 14 (figura 29). Cuenta con 9.58 ha de extensión, y se ubica a 28.57 m s.n.m., lo que lo sitúa en el estrato bajo. Dentro del lote se cuenta con caña en plantía de la variedad CG-9846, sembrado el 24 de diciembre de 2015, con distanciamiento entre surcos de 1.5 m.



Fuente: Google Earth®, 2016

Figura 29. Ubicación del lote 14, finca La Prosperidad

a. Características climáticas

En la localidad dos tiene influencia la estación pluviométrica 1128-1, con 13 años de registro (figura 30). Presenta una precipitación media anual de 1,459.81 mm de lluvia por año, siendo 2010 el año con registro de mayor precipitación, con 2,872.6 mm de lluvia por año.

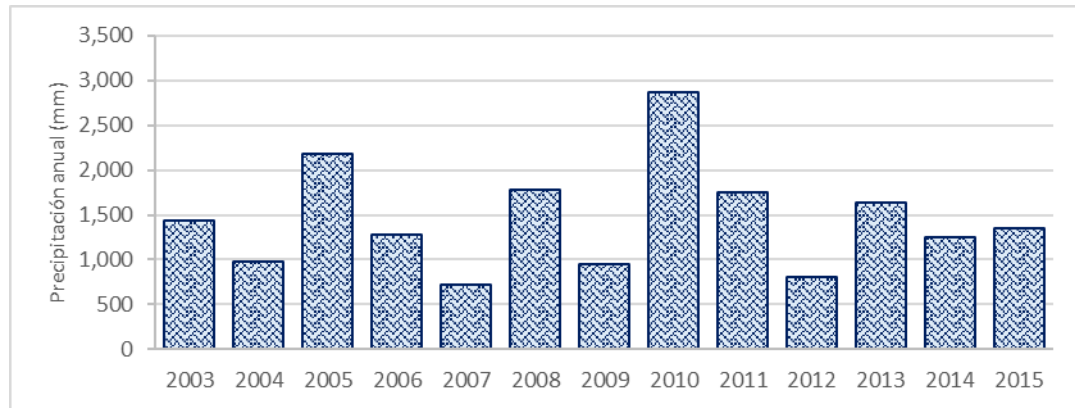


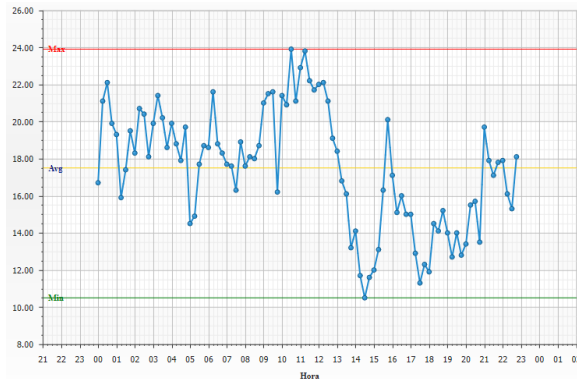
Figura 30. Precipitación anual en finca La Prosperidad

La evapotranspiración potencial estimada a través de los registros diarios de la estación meteorológica Amazonas, durante el año 2014 a 2016 (cuadro 13), se distribuye 27 % del tiempo con una Eto entre 5 a 5.5 mm/día, el 77 % del tiempo la Eto es inferior a 5.5 mm/día, 96 % del tiempo la Eto es inferior a 7 mm/día y existen tres días en que la Eto se encuentra entre 8.5 y 9 mm/día.

Cuadro 13. Evapotranspiración potencial en finca La Prosperidad

ETO	Frecuencia	Frecuencia porcentual	Frecuencia acumulada
2.5	0	0%	0%
3	2	1%	1%
3.5	2	1%	1%
4	24	7%	8%
4.5	68	19%	26%
5	89	24%	51%
5.5	97	27%	77%
6	56	15%	92%
6.5	7	2%	94%
7	8	2%	96%
7.5	3	1%	97%
8	1	0%	98%
8.5	6	2%	99%
9	3	1%	100%
TOTAL	366	100%	100%

La evapotranspiración más alta registrada se observó el 10 de febrero de 2016 (figura 31), fecha similar a la observada en la estación Costa Brava, con una Eto de 8.74 mm/día, seguido por los registros del 9 de abril de 2014 y 28 de noviembre de 2014, con valores de Eto de 8.72 y 8.55 mm/día respectivamente. El 10 de febrero de 2016 se registró en la estación Amazonas una temperatura media de 28.7 °C, siendo la temperatura máxima de 37 °C y la mínima de 24.10 °C. con una radiación total de 23,675.8 W/m² durante el día, y la humedad relativa máxima de 39 %, mínima de 27 %, y media de 34 %, con velocidades de viento desde 10.5 hasta 23.9 km/h con una media de 17.6 km/h.



Fuente: Redmet-ICC, 2016

Figura 31. Velocidades de viento (en km/h) registradas en la estación Amazonas, en fecha 10 de febrero de 2016.

b. Características edafológicas

El pante presenta suelo de textura Franco arenosa (figura 32). Con 25.13 % de capacidad de campo, punto de marchitez permanente de 15.05 %, y una densidad aparente de 1.1 g/cm³.



Figura 32. Calicata realizada en finca La Prosperidad

E. Localidad 3: California

La tercera localidad se ubicó en el lote 221A, de la finca California (figura 33). Tiene una extensión de 10.25 ha, a una altitud de 19.12 m s.n.m., ubicándola en el estrato litoral. La plantación de caña en el lote se sembró el 27 de diciembre de 2015, renovando con la variedad CG-9846, con distanciamiento entre surcos de 1.5 m.



Fuente: Google Earth®, 2016

Figura 33. Lote 221A de finca California

a. Características climáticas

La estación pluviométrica 1111-1 tiene influencia sobre la localidad tres (figura 34). Sus registros inician el año 1993 hasta el 2015, con una precipitación media anual de 1,930.8 mm. El año con registro de mayor precipitación fue el 2010 con 3,177 mm.

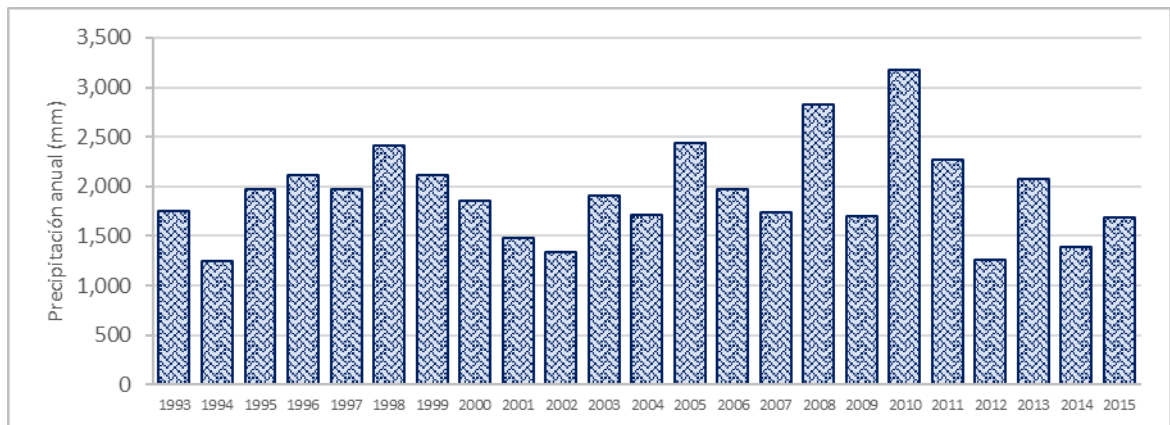


Figura 34. Precipitación anual en finca California

En la localidad tres la estación con influencia es la San Rafael, ubicada en las coordenadas 14.02° y -90.63°, con la información meteorológica registrada en la estación se determinó la evapotranspiración potencial diaria entre el año 2013 y 2015 observándose que los valores de Eto más recurrentes son los encontrados entre 4.5 mm/día y 5 mm/día, la máxima Eto registrada se encontró entre 6.5 mm/día a 7 mm/día, y la mínima entre 2.5 mm/día a 3 mm/día, el 99 % de los registros de Eto son inferiores a 6.5 mm/día (cuadro 14).

Cuadro 14. Evapotranspiración potencial en finca California

ETO	Frecuencia	Frecuencia porcentual	Frecuencia acumulada
2.5	0	0%	
3	1	0%	0%
3.5	4	1%	1%
4	42	11%	13%
4.5	86	23%	36%
5	115	31%	68%
5.5	96	26%	94%
6	15	4%	98%
6.5	4	1%	99%
7	2	1%	100%
7.5	1	0%	100%
TOTAL	366	100%	100%

b. Características edafológicas

El lote presenta suelos Francos (figura 35). Con capacidad de campo de 27.15 %, punto de marchitez permanente de 13.21 % y densidad aparente de 1.15 g/cm³.



Figura 35. Calicata realizada en finca California

2.3 OBJETIVOS

2.3.1 Objetivo General

Mejorar la eficiencia de uso del agua de riego en el cultivo de la caña de azúcar, al basar la programación del riego en el balance hídrico, en el Ingenio Santa Ana.

2.3.2 Objetivos específicos

1. Determinar el efecto de las dos programaciones de riego, sobre el tonelaje de caña de azúcar por hectárea y la producción de azúcar por hectárea.
2. Determinar el efecto de las dos programaciones de riego sobre la longitud de entrenudos, altura y población de plantas por metro lineal.
3. Estimar la lámina de agua aplicada por evento de riego a través de las pruebas de uniformidad de riego.
4. Validar las estimaciones de humedad del balance hídrico a través del monitoreo con sondas FDR.
5. Determinar la utilidad parcial de implementar ambas programaciones de riego en campo.

2.4 HIPÓTESIS

La programación del riego basada en el balance hídrico presenta mejor efecto en la producción de caña y la producción de azúcar por hectárea, porque bajo este contexto de planificación la caña se abastece de la cantidad justa de agua en el momento más oportuno para llevar a cabo todas sus funciones fisiológicas.

2.5 METODOLOGÍA

2.5.1 Descripción de tratamientos

El proyecto de investigación consistió en la comparación de dos programaciones de riego, en tres localidades del Ingenio Santa Ana. El primer tratamiento consistió en la programación usada por las fincas del ingenio y la segunda programación se basó en un balance hídrico.

A. Tratamiento 1: Testigo relativo

La programación de riego usada en este tratamiento se basó en los tiempos y frecuencias de riego usados dentro de las fincas del ingenio. El tratamiento se diseñó para tener una frecuencia de riego de 15 días con tiempo de riego de 2 h y un marco de riego de 54 m entre aspersores y 54 m entre laterales.

B. Tratamiento 2: Balance hídrico

La decisión de regar en este tratamiento estuvo regida por el balance hídrico asociando las características físicas del suelo, la meteorología y los requerimientos hídricos de la planta. El balance de humedad se realizó a diario tomando en cuenta entradas de agua como: lluvia, riego, y aporte capilar, al igual que salidas como la evapotranspiración, para estimar el cambio de humedad en el suelo, determinando la lámina de agua y día propicio de riego. Por las razones expuestas tanto el tiempo como la frecuencia de riego fueron variables en cada etapa fenológica.

a. Tamaño de unidad experimental

El tamaño de cada unidad experimental varió según el tratamiento, acoplándose al marco de riego usado. Las unidades experimentales del tratamiento 1 se diseñaron para tener un ancho de 54 m; en cambio, las unidades experimentales del tratamiento 2 tuvieron 45 m de ancho. La longitud de cada unidad experimental varió según la longitud de los surcos que lo constituían.

b. Diseño de bordes entre tratamientos

Por la naturaleza de la investigación fue necesario considerar la zona de traslape entre el riego de un tratamiento y otro, evitando de esta forma la interacción entre cada unidad experimental (figura 36). La zona de traslape denominada borde, tiene 45 metros de ancho

por la longitud de los surcos, distanciamiento entre aspersores usado en el marco de riego del tratamiento dos.

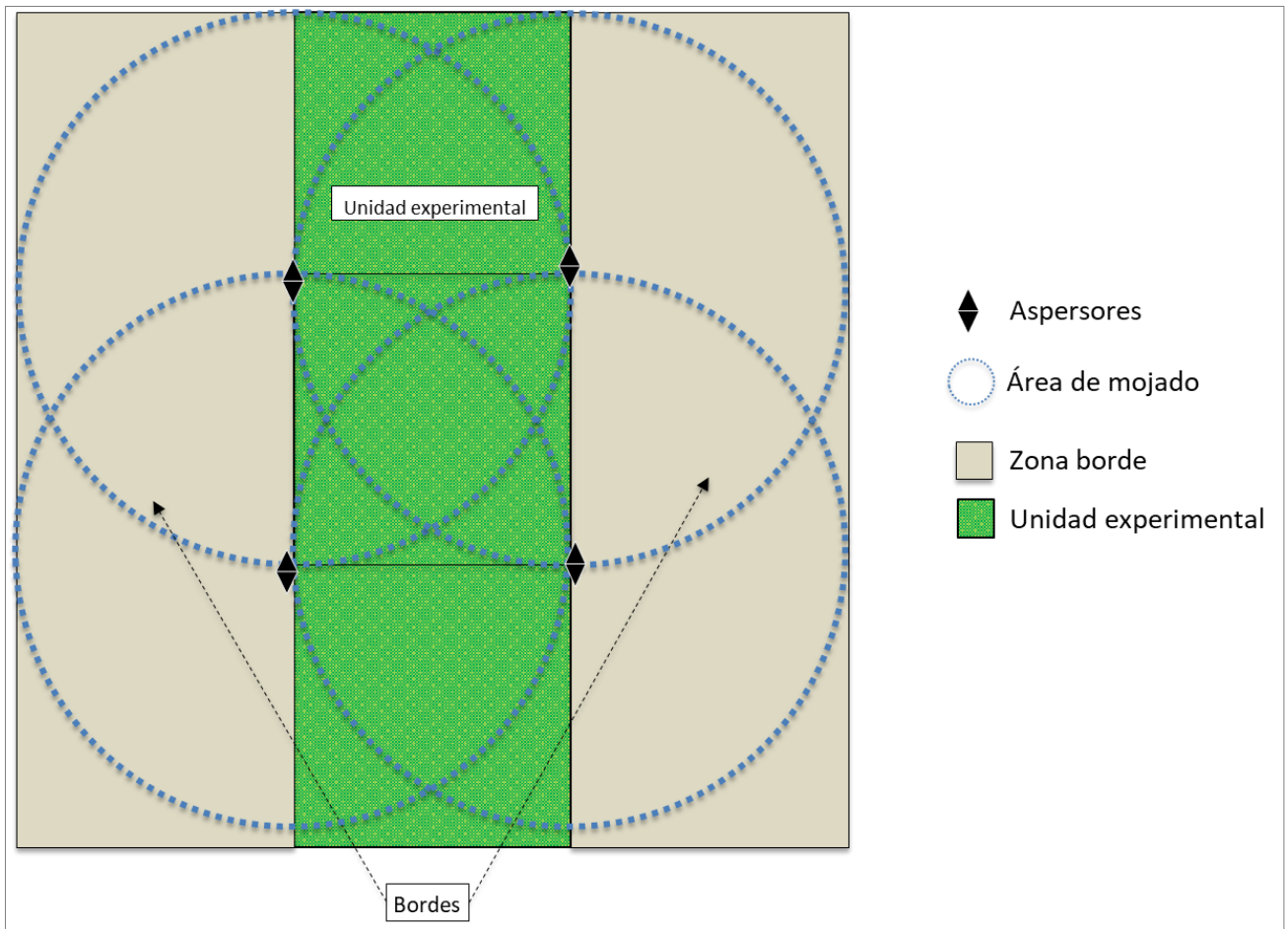


Figura 36. Diseño de bordes entre unidades experimentales

C. Distribución de unidades experimentales

Teniendo en cuenta que se establecieron 3 repeticiones de la investigación en 3 localidades, se diseñó la distribución de las franjas en cada una, quedando de la forma siguiente.

a. Localidad 1: Finca Agrícola del Sur

Establecido en el lote 521, de norte a sur se dejó un borde que impidiera que el riego en lotes aledaños afectase el contenido de agua de las parcelas a evaluar (figura 37). El tratamiento 1 se diseñó para cubrir 1.05 ha, seguido por el borde; el tratamiento 2 se estableció con 0.76 ha de extensión, seguido por el borde que impedía que el riego en el resto del lote afectara la unidad experimental.

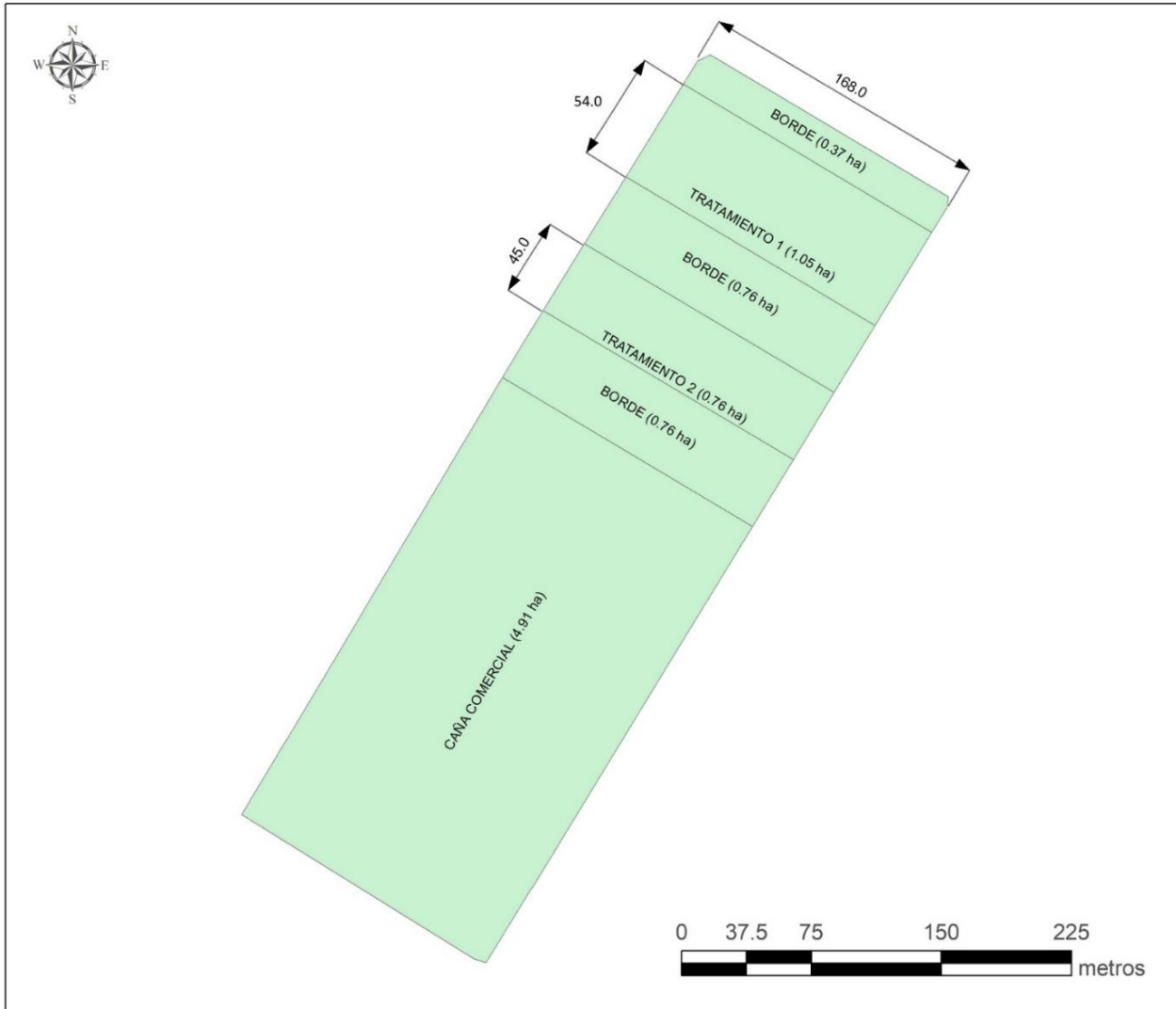


Figura 37. Distribución de tratamientos dentro del lote 521, de finca Agrícola del Sur

Del lote 521 se ocupó 3.81 ha para la investigación, dejando 4.91 ha con caña comercial sumando las 8.72 ha de extensión del lote.

b. Localidad 2: Finca La Prosperidad

En esta localidad se ocuparon 7.26 ha de 10.65 ha que poseía el lote (figura 38). Éste se seccionó de Este a Oeste en un área de 3.39 ha con caña comercial, seguido por 1.33 ha ocupados por el borde, después del cual se ubicó el tratamiento 1 ocupando 1.61 ha; entre los tratamientos se dejó otro borde de 1.35 ha, seguido por el tratamiento 2 de 1.37 ha de extensión, concluyendo con el último borde de 1.61 ha de extensión.

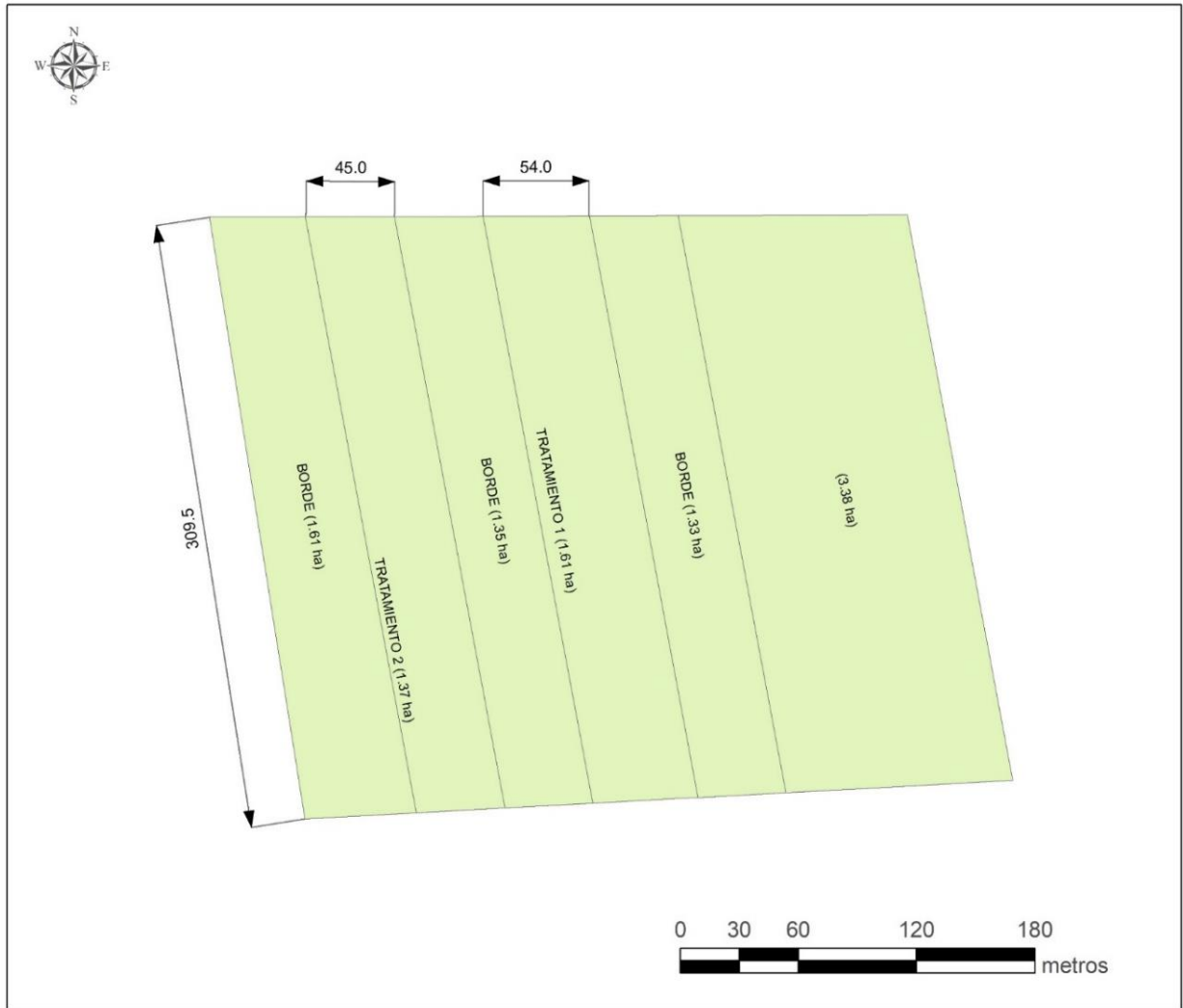


Figura 38. Distribución de tratamientos dentro de lote 14, finca La Prosperidad

c. Localidad 3: Finca California

La investigación se estableció en el lote 221A, con una extensión de 10.42 ha, se aprovecharon 4.33 ha para la investigación, tal como se observa en la figura 39, distribuyéndose en 0.97 ha ocupadas por el borde, después del cual se trazó el tratamiento 2 con 1.01 ha de área, seguido por una sección borde de 0.97 ha, separando las unidades experimentales, el tratamiento 2 ocupó un área de 0.99 ha, terminando con otra franja borde de 0.39 ha.



Figura 39. Distribución de tratamientos dentro de lote 221A, finca California

2.5.2 Manejo del experimento

Para el cumplir con los objetivos de investigación propuestos se desarrolló la metodología detallada en la figura 40.

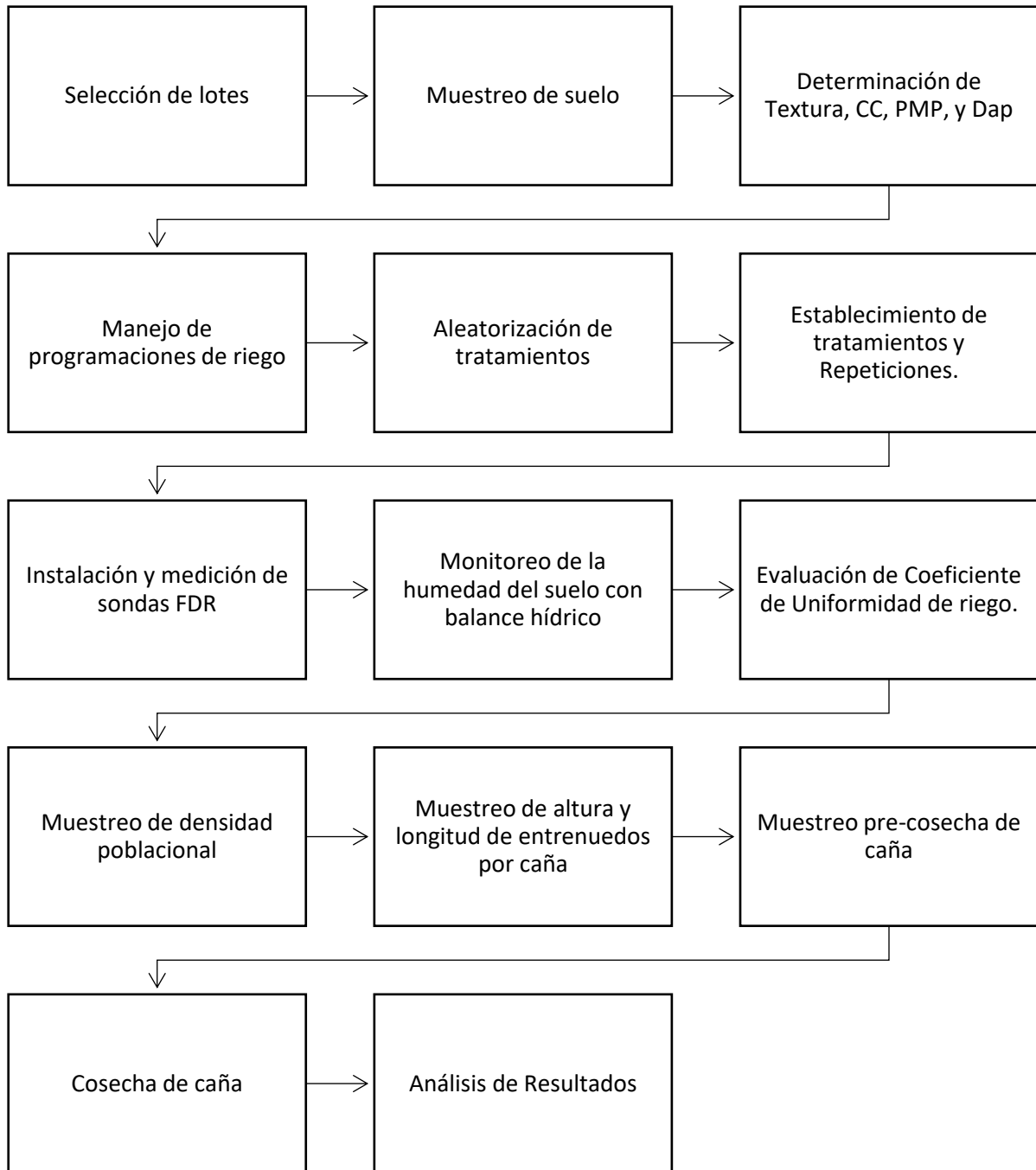


Figura 40. Resumen diagramático de metodología seguida durante investigación

A. Selección de lotes

Cada lote donde se estableció la investigación cumplió con tres criterios de selección.

- **Lote con caña plantía:** Garantizado la uniformidad en la población de caña.
- **Con sistema de riego por aspersión:** De las 25,934 ha administradas, 59.34 % del área es regado con el sistema de riego por aspersión, de allí la importancia de efficientizar el uso del agua en este sistema.
- **Representatividad de estrato altitudinal:** Dependiendo del estrato altitudinal las condiciones meteorológicas y la demanda de agua del cultivo varía, por lo que cada localidad se estableció en distintos estratos altitudinales clasificándose en: Litoral (0-40 m s.n.m.), bajo (40-100 m s.n.m.), medio (100-300 m s.n.m.), y alto (>300 m s.n.m.).

B. Muestreo de suelos

Esta actividad se realizó según la guía técnica para la caracterización física de suelos publicada por CENGICAÑA resumiéndolo en las fases que se detallan en la figura 41.

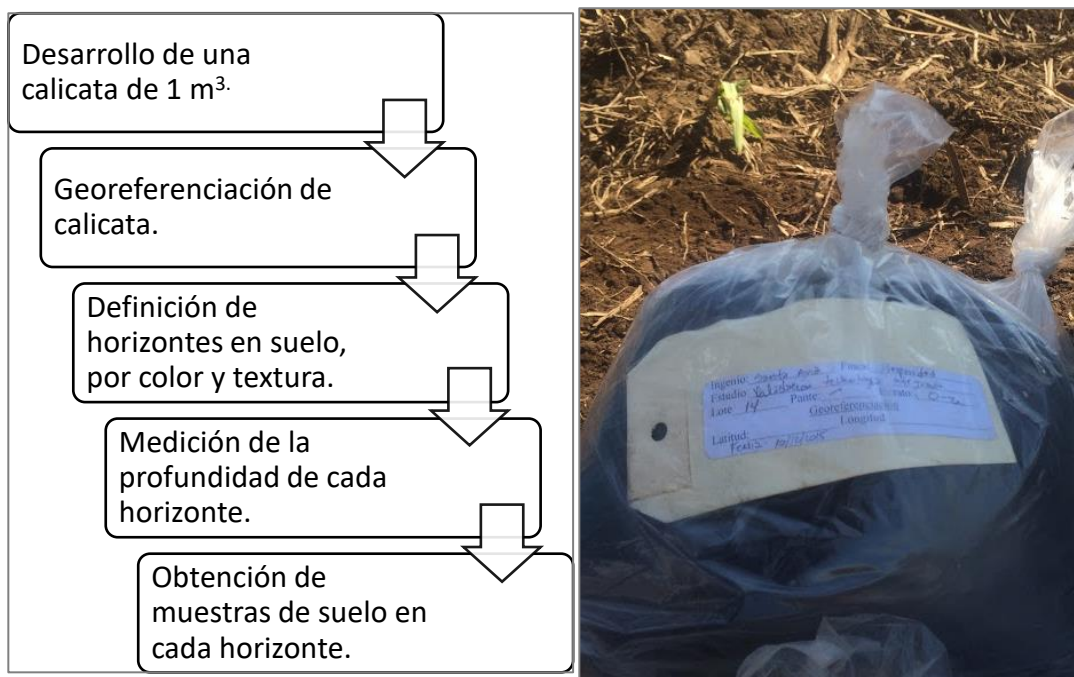


Figura 41. Diagrama de desarrollo de muestreo de suelo por lote y muestra lista para llevar a laboratorio

Las muestras obtenidas fueron llevadas al laboratorio de suelo de CENGICAÑA donde se les determinó la densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

C. Manejo de las programaciones de riego

a. Riego del testigo relativo

Establecidas la frecuencia de 15 días y tiempo de riego de 2 h, con marco de riego de 54 m entre laterales y 54 m entre aspersores, se le dio seguimiento al riego en el tratamiento uno con las pruebas de uniformidad para estimar la lámina de agua aplicada por evento de riego. La lámina aplicada se registró en el balance hídrico desarrollado para el tratamiento, con lo que se pudo monitorear el contenido de humedad en el suelo y compararlo con la humedad estimada para el tratamiento dos.

b. Riego con balance hídrico

El riego aplicado en el tratamiento dos fue aplicado basado en la información proporcionada por el balance hídrico, una vez alimentado con las características del suelo, las características fenológicas de la caña, la meteorología, y el registro de la lámina de agua y fecha de aplicación del riego. Este programa se desarrolló a través de un libro de cálculo con el software Excel® para elaborar el balance hídrico diariamente.

i. Características físicas del suelo

Las características de suelo medidas para el desarrollo del balance hídrico fueron: textura, capacidad de campo (C.C.), punto de marchitez permanente (P.M.P.) y densidad aparente (D.A.P.), detallada en la figura 42, esta información sirvió para determinar la lámina de agua aprovechable (LAA) en los horizontes de 0 cm a 20 cm, de 20 cm a 40 cm, y de 40 cm a 60 cm de profundidad, a través del modelo siguiente.

$$LAA = \frac{C.C. - P.M.P.}{100} * D.A.P. * 10$$

Donde:

LAA: Lámina de agua aprovechable

D.A.P.: Densidad aparente en g/cm³

C.C.: Capacidad de campo en %

P.M.P.: Punto de marchitez permanente en %

Con la LAA se determinó la lámina de agua rápidamente aprovechable LARA, al multiplicarse la primera con el déficit permitido de manejo DPM.

CARACTERISTICAS EDAFICAS DEL SUELO						
Estrato			Textura	%CC	% PMP	D.A.P.(gr/cc)
No.	DE	A				
1	0	20	Franco Arenoso	26.54	16.62	1.13
2	20	40	Franco Arenoso	26.95	15.32	1.07
3	40	60	Franco Arenoso	21.92	13.21	1.11
4						
5						
6						

Referencia: CC= Capacidad de campo, PMP= Punto marchitez permanente, Dap= Densidad aparente

Fuente: Sistema de balance Hídrico Cengicaña, 2016

Figura 42. Pantalla de registro de características físicas del suelo en el balance hídrico

ii. Fenología del cultivo

Para determinar el requerimiento hídrico diario del cultivo fue necesario alimentar el programa con información referente a la fecha de siembra, la duración de cada etapa fenológica, el K_c del cultivo y la profundidad radicular en cada una de las etapas, para lo cual se tomó la información proporcionada por Castro (2011) (figura 43). Especificando que la etapa de iniciación tiene una duración de 45 días, con un K_c de 0.4 y una profundidad radicular de 30 cm, mientras la etapa de macollamiento tiene una duración de 90 días, K_c de 0.6 y profundidad radicular de 40 cm, la etapa de elongación tiene una duración de 180 días, con K_c de 1 y una profundidad radicular de 60 cm, al igual que la maduración con duración de 50 días y K_c de 0.6, sumando los 365 días que dura el ciclo fenológico del cultivo.

INFORMACION GENERAL				
Ubicación del área del cultivo - <i>Ingresar información en celdas de color amarillo.</i>				
Ingenio	Santa Ana	Área física de cobertura de riego (Has)	9.58	
Finca	Prosperidad	Georeferencia	Latitud	
Estrato Altitudinal	Litoral		Longitud	
Código de Finca	1128	Variedad	CG 98-46	
Código de Lote (s)	14	F. Siembra ó Corte	Día	Mes
Sistema de riego	Aspersión Cañón		24	12
Código del equipo	294-171	Número de cortes	0	
		Fecha programada del próximo corte	19	11
			2016	

Características agronomicas del cultivo				
Etapas del Cultivo				
Etapa	Duración	F. Finalización	Kc	Prof. Radicular (cm)
Iniciación	45	07/02/2016	0.4	30
Macollamiento	90	07/05/2016	0.6	40
Elongación	180	03/11/2016	1	60
Maduración	50	23/12/2016	0.6	60

Fuente: Sistema de balance Hídrico Cengicaña, 2016

Figura 43. Pantalla de registro de características fenológicas del cultivo

En esta pantalla se especificó la ubicación del lote, el sistema de riego y equipo de bombeo utilizado para llevar a cabo la labor de riego.

iii. Meteorología en la localidad

La información meteorológica de la localidad se descargó a diario de la base de datos de la red meteorológica del Instituto Privado de Investigación sobre el Cambio Climático -ICC- (con dirección web <https://redmet.icc.org.gt>); de la información se determinó la temperatura media diaria, la temperatura mínima, temperatura máxima, radiación acumulada durante el día, la humedad relativa máxima y mínima y la velocidad del viento. Toda la información fue necesaria para determinar la evapotranspiración potencial en la localidad, a través del modelo de Penman-Monteith.

$$E_{t_o} = \frac{0.408 * \Delta(R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 * u_2)}$$

Donde E_{t_o} es la evapotranspiración potencial en mm/día, R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo en MJ/m²*día, R_a es la radiación extraterrestre en mm/día (datos de

tablas), G representa el flujo de calor de suelo en $\text{MJ/m}^2\cdot\text{día}$, T es la temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$), U_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m/s), e_s equivale a la presión de vapor de saturación en kPa, e_a la presión real de vapor (kPa), $(e_s - e_a)$ es el déficit de presión de vapor en kPa, Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor en $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$, y γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

La información climática que requirió el balance hídrico para estimar la evapotranspiración potencial en la finca estudiada fue: Temperatura media, mínima y máxima en grados Celsius, radiación diaria acumulada en $\text{W/m}^2/\text{día}$, porcentaje de humedad relativa mínima y máxima por día y la velocidad media del viento durante el día en Km/h (figura 44).

FUENTES DE INFORMACION		FUENTE DE INFORMACIÓN METEOROLOGICA DIARIA, CONSULTAR LA PAGINA WEB							
Estación Meteorologica - ICC	Amazonas	Latitud	14.07	Longitud	-90.77	http://redmet.icc.org.gt/login			
Finca donde ubica el pluviometro	Prosperidad								
CONDICIONES CLIMATICAS									
No	FECHA	T° Media (°C)	T Min	T° Max (°C)	Radiación diaria acumulada (W/m^2)	HR Mínima (%)	HR Máxima (%)	Viento Media (Km/h)	Lluvia(mm) Prosperidad
1	24/12/2015	27.09	20.50	35.50	21053.50	49.00	100.00	3.47	0
2	25/12/2015	27.09	21.70	35.30	21062.90	54.00	100.00	3.50	0
3	26/12/2015	26.70	19.70	36.10	21124.00	44.00	100.00	4.24	0
4	27/12/2015	26.55	20.20	35.50	20649.70	47.00	100.00	3.69	0
5	28/12/2015	26.26	19.50	35.40	20154.20	47.00	100.00	3.51	0
6	29/12/2015	26.70	19.90	34.70	19341.10	49.00	100.00	4.34	0
7	30/12/2015	26.80	20.30	35.20	20694.80	47.00	100.00	3.98	0
8	31/12/2015	26.89	20.50	36.10	20785.00	44.00	100.00	4.15	0
9	01/01/2016	27.53	21.50	39.50	19070.50	30.00	100.00	5.54	0
10	02/01/2016	26.89	20.30	35.30	18495.30	48.00	99.00	5.60	0
11	03/01/2016	27.72	22.10	37.40	20915.30	39.00	100.00	4.18	0
12	04/01/2016	26.96	20.10	35.30	20094.00	48.00	100.00	3.43	0
13	05/01/2016	26.84	20.30	36.00	20747.60	40.00	100.00	4.16	0

Fuente: Sistema de balance Hídrico Cengicaña, 2016

Figura 44. Pantalla de registro de información meteorológica de la localidad

Como se puede observar, la información que requiere el modelo para determinar la evapotranspiración potencial es mucho mayor a la registrada por las estaciones meteorológicas por lo que la información restante se estimó basado en la ubicación de la estación meteorológica. La constante psicrométrica (γ) se estimó basado en la altitud a la que se encontraba la estación, la radiación extraterrestre (R_a) se estimó basado en la distancia relativa inversa Tierra-Sol, el ángulo de radiación a la puesta del sol, la declinación solar y la duración máxima de la insolación a través del modelo:

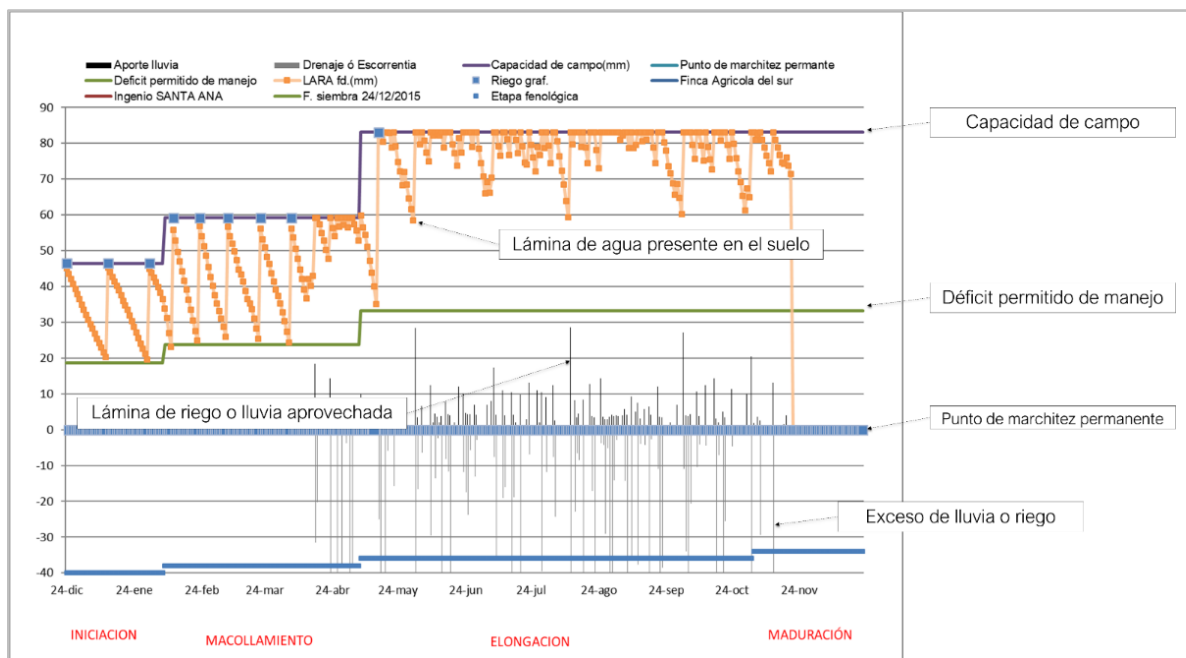
$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \text{cos}(\varphi) \text{cos}(\delta) * \text{sen}(\omega)]$$

Donde R_a es la radiación extraterrestre ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$), G_{sc} es la constante solar de $0.082 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{min}$, d_r es la distancia relativa inversa Tierra-Sol, ω_s es el ángulo de radiación a la puesta del sol, φ es la latitud en radianes y δ es la declinación solar en radianes.

En el mismo cuadro se registró la lluvia, utilizando los datos medidos del pluviómetro más cercano, delimitado a través de un polígono de Thiessen.

iv. Seguimiento diario de humedad

El monitoreo de la humedad se realizó a través de un gráfico que detallaba día a día el contenido de humedad el suelo, limitándose entre la capacidad de campo y punto de marchitez permanente (figura 45). Según la estimación se estimaba la evapotranspiración del cultivo se restaba la lámina de agua existente en el suelo, con lo cual se pudo proyectar la próxima fecha de riego, antes de que el suelo llegara al déficit permitido de manejo, como se observa en la figura siguiente.



Fuente: Sistema de balance Hídrico Cengicaña, 2016

Figura 45. Gráfico utilizado para el monitoreo de la humedad en el suelo

v. Proyección de próxima fecha de riego

Para estimar la próxima fecha de riego se utilizó el contenido de agua presente en el suelo y la evapotranspiración real media de los últimos seis días, para determinar el número aproximado de días que el contenido de humedad tardaría en llegar al déficit permitido de manejo.

$$\text{Días para llegar a DPM} = \frac{\text{Humedad actual} - \text{Humedad al llegar a DPM}}{\text{Evapotranspiración real medio de últimos seis días}}$$

vi. Determinación de tiempo de riego

Al conocerse la lámina de agua rápidamente aprovechable -LARA- y la eficiencia de aplicación del sistema se determinó la lámina bruta a aplicar por evento de riego y con la intensidad de riego, cuya fórmula se detalla a continuación, se determinó el tiempo de riego teniendo en cuenta la profundidad radicular efectiva de la caña en cada etapa fenológica. Una vez estimada la próxima fecha y el tiempo de riego se enviaba el informe al caporal de riego el cual programaba el riego con las especificaciones dadas.

$$IR = \frac{Q_{asp}}{(Dist. Asp)(Dist. Lat)} * 1000$$

Donde:

IR: Intensidad de riego (mm/hora)

Q_{asp} : Caudal del aspersor (m^3 /hora)

Dist.: Asp: Distanciamiento entre aspersores (m)

Dist. Lat: Distanciamiento entre laterales (m)

vii. Registro de riego aplicado

Durante cada evento de riego se realizó una prueba de uniformidad en la cual se determinó la lámina de riego aplicada, la uniformidad del riego, la uniformidad de distribución y la intensidad del riego. La lámina de riego aplicada se registró en cada riego en la pantalla desarrollada dentro del libro de cálculo del balance hídrico (figura 46).

OPERACIÓN DEL RIEGO					
Planificación del riego			Programación de riegos (postcorte & Precorte)		
Metodo de riego	Aspersión		Post Corte	Fecha primer riego	25/12/2015
Deficit permitido	0.6			Fecha último riego	15/05/2016
Lámina neta/riego (mm)			Precorte	Fecha primer riego	
Eficiencia de Riego	0.8			Fecha último riego	
Frecuencia de riego (días)	13		Último riego (Días antes del corte)		20
Tiempo de riego (hrs)	2		Primer riego (días después del Corte)		1
Lámina aplicada en 1er. Riego (mm)			Fecha de cosecha		19/11/2016
Lámina de humedad inicial (mm)	0				
Riego postcorte			Riego precorte		
Inicio	Días deficit	Finalizacion	Inicio	Días deficit	Finalizacion
25/12/2015	142	15/05/2016	00/01/1900	0	00/01/1900
REGISTRO DE RIEGOS -Ingresar la fecha y lámina de riego aplicada en celdas amarillas.					
Etapa fenológica	No. Riego	FECHA	LÁMINA NETA (mm)	Observaciones	
Iniciación	1	25/12/2015	60.00		
Iniciación	2	12/01/2016	65.00		
Iniciación	3	03/02/2016	68.00		
Macollamiento	4	15/02/2016	50.50		
Macollamiento	5	25/02/2016	45.20		
Macollamiento	6	07/03/2016	35.66		

Fuente: Sistema de balance Hídrico Cengicaña, 2016

Figura 46. Pantalla de registro de lámina de riego aplicada por evento

D. Riego de establecimiento

A cada unidad experimental se le aplicaron tres riegos de establecimiento para garantizar un porcentaje de brotación uniforme. A partir del cuarto riego cada unidad experimental se regó según la programación de riego que presentaba. La duración del riego de establecimiento por evento fue de 2.5 horas con un distanciamiento de 45 m entre aspersores y laterales, marco de riego usado en el tratamiento dos, y frecuencia de 15 días. El primer riego se aplicó 24 horas después de que se sembrara el cultivo, por lo que los primeros 35 D.D.S. el cultivo fue regado uniformemente sin importar el tratamiento al que pertenecía.

E. Instalación de sondas FDR

Para monitorear la humedad en cada unidad experimental se instalaron tubos de acceso de PVC, con diámetro de 2 pulgadas y una longitud de 70 cm. El proceso de instalación inició con la nivelación de la superficie e instalación de un trípode que aseguró que la perforación del orificio, donde se instala el tubo de acceso, se encuentre perpendicular a la superficie

terrestre. Perforado el orificio se aseguró el tubo de acceso y se le instaló un corcho en la parte inferior que impidiera la entrada de agua al sistema. Se realizó una medición de prueba, se tapó el tubo de acceso con un tapón diseñado para ello y se georreferenció el punto de medición (figura 47). Por tratamiento se instaló un tubo de acceso aproximadamente 30 m dentro de la calle acceso, teniendo un total de 6 puntos de medición en las tres localidades.

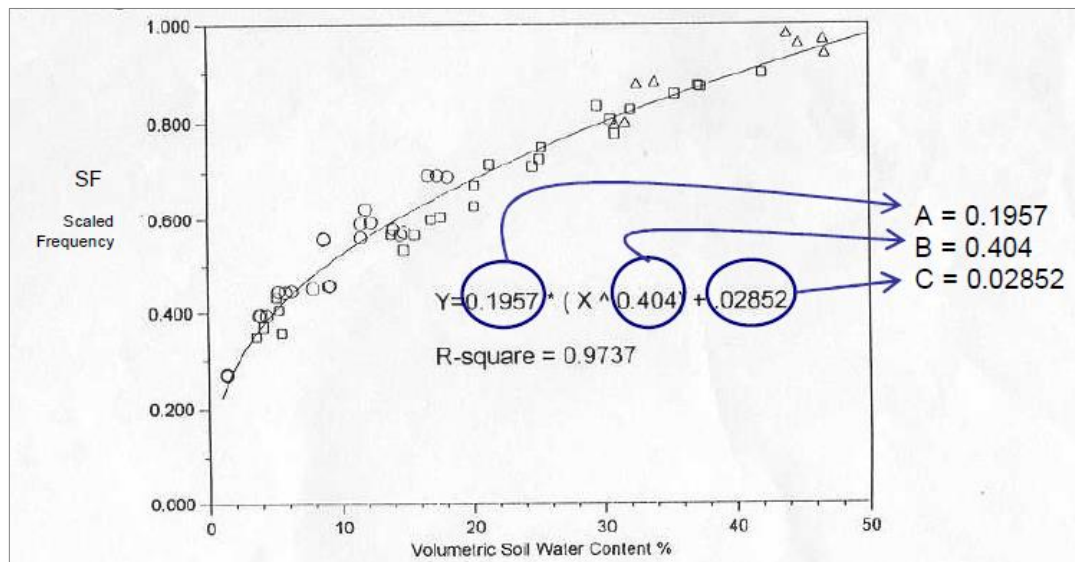


Figura 47. Diagrama de proceso de instalación del tubo de acceso para la medición de humedad con sondas FDR

a. Calibración de ecuación

Antes de realizar mediciones en las localidades se realizó una calibración de la ecuación utilizada por el equipo, ya que estos instrumentos no entregan datos precisos del contenido de humedad volumétrica en todo tipo de suelos sin antes realizar una calibración para un tipo de suelo específico. Por ello para el desarrollo de las mediciones en los puntos de investigación fue necesario realizar una calibración, esta consiste en relacionar a través de una ecuación matemática la frecuencia escalada medida por el equipo y el contenido volumétrico de agua en el suelo, con ello determinar un modelo de correlación con tres

constantes A, B y C las cuales se utilizan para calibrar la ecuación con la que se estimará el contenido de humedad en el suelo (figura 48).



Fuente: Sentek, 2011

Figura 48. Relación del contenido volumétrico de agua y la escala de frecuencia medida por la sonda FDR

Para la calibración del equipo se siguieron los procedimientos de calibración recomendados por el fabricante del equipo. Siguiendo los pasos siguientes:

1. Se seleccionó una superficie de 14 m de ancho por 6 m de largo donde se ubicaron 6 tubos de acceso en dos hileras, dividiéndose en tres mediciones distintos y dos repeticiones para cada uno, dividiendo las mediciones por siete metros y ubicando los tubos de la misma medición a cada tres metros (figura 49).
 - a. Medición 1: se ubicaron dos tubos en suelo con contenido de agua alto, llegando al punto de encharcamiento.
 - b. Medición 2: se ubicaron dos tubos en el suelo con contenido de humedad medio
 - c. Medición 3: se ubicaron dos tubos en suelo seco.

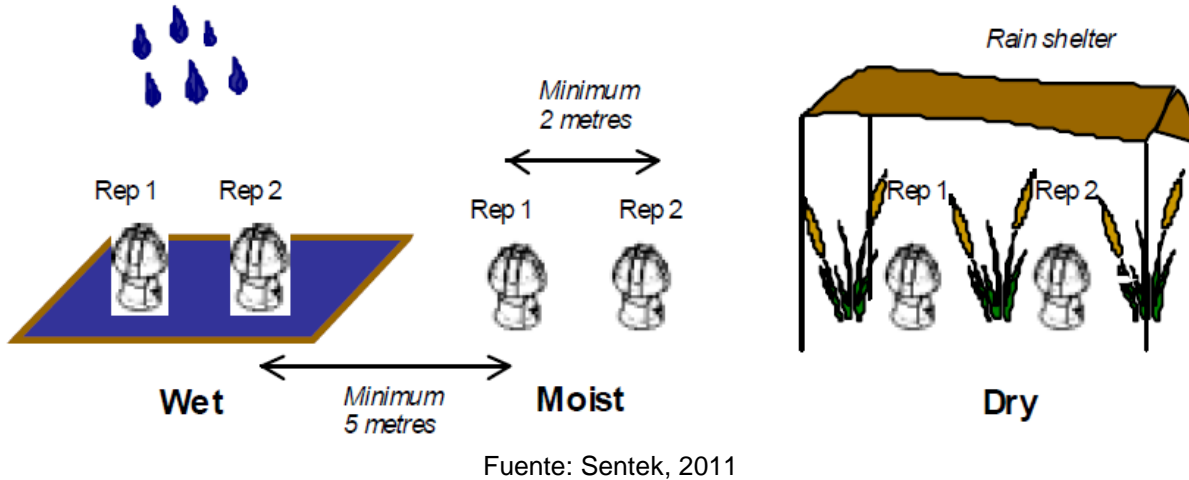


Figura 49. Ubicación de mediciones para la calibración de la sonda FDR

Para llegar al contenido de humedad deseado cada punto de medición se le fue aplicado la cantidad de agua requerida a excepción del punto tres donde el riego se había quitado 14 días antes. Después de la última aplicación de riego se le dio un tiempo de espera al suelo de 24 horas antes de seguir el paso dos.

2. Pasadas las 24 horas de espera se realizaron mediciones tomando lecturas de las frecuencias en las dos repeticiones de cada medición, por lo que se tomaron dos lecturas por cada 10 cm de profundidad.
3. Las lecturas de frecuencia se convirtieron en lecturas de frecuencias normalizadas a través de la ecuación:

$$SF = \frac{F_A - F_S}{F_A - F_W}$$

Donde F_A es la lectura realizada por el Diviner 2000 en un tubo de PVC al aire, F_W es la lectura realizada en un tubo de PVC sumergido en agua y F_S es la lectura en un tubo de PVC en el suelo a cada profundidad en particular.

4. Inmediatamente después de la medición de humedad con el equipo se realizaron muestreos lo más cercano posible del tubo de acceso, tomando muestras de suelo con cilindros metálicos de volumen conocido a cada 10 cm hasta llegar a los 70 cm de profundidad donde había llegado el tubo de acceso, teniendo cuidado que los

cilindros quedaran posicionados a no más de 10 cm del tubo para que pudiera entrar en el radio de influencia del sensor.

5. El contenido de los cilindros se depositó en una bolsa rotulada identificando el punto de medición, repetición y profundidad a la que se obtuvo la muestra, luego se enviaron al laboratorio para determinar el contenido de humedad volumétrico presente en cada uno.
6. Con todos los datos se hicieron pares para después graficarlos, colocando en el eje x los valores del contenido volumétrico de agua en las muestras y en el eje y los valores de frecuencia normalizada medidos. A través de este grafico se obtuvo la ecuación de calibración y mediante el análisis de regresión se determinó el coeficiente de determinación.

F. Instalación de tubos piezométricos

El monitoreo del nivel freático se realizó con tubos piezométricos que consisten en tubos de PVC con 200 cm de longitud y diámetro de 2 pulgadas, con perforaciones de 0.7 cm de diámetro a cada 20 cm a lo largo de los tubos. Los tubos perforados se cubrieron a nivel longitudinal con tela geotextil, permitiendo la entrada de agua, pero no residuos sólidos que pudieran acumularse dentro de los tubos. En campo se perforó un orificio en el suelo de 220 cm de profundidad con diámetro de 4 pulgadas, del cual 20 cm fue llenado de grava, se instaló el tubo dejando 10 cm sobre la superficie y se concluyó con el llenado del orificio con grava, tal como se muestra en la figura 50.



Figura 50. Proceso de instalación de tubos piezométricos en campo

G. Medición de sondas FDR y tubos piezométricos

La medición de humedad con sondas FDR y de los tubos piezométricos se realizó semanalmente basándose en la metodología siguiente.

a. Medición de FDR

Para realizar la lectura de humedad en el suelo se hizo un barrido del sensor dentro de cada tubo de acceso, en una sola acción se registraron los datos de cada horizonte en el perfil del suelo hasta los 70 cm de profundidad ya que la sonda mide el contenido de humedad en el suelo a cada intervalo uniforme de 10 cm, por lo que en una sola medición se obtuvo el contenido de humedad de siete estratos de suelo (figura 51).



Figura 51. Medición de puntos de muestreo con sondas FDR en campo

b. Medición de tubos piezométricos

La medición del nivel freático se realizó a través de una varilla de hierro con longitud conocida al introducirla dentro del tubo piezométrico hasta llegar al fondo, después de 30 segundos se removió la varilla y se midió la longitud mojada (figura 52). Por diferencia, entre la longitud del tubo piezométrico y la longitud de varilla mojada, se determinó la profundidad a la que se encontraba la capa freática.



Figura 52. Medición de tubo piezométrico en campo

H. Evaluación de uniformidad de riego

La prueba de uniformidad se realizó para determinar la lámina de agua aplicada por evento de riego para lo cual se ubicaron recipientes recolectores entre los aspersores. El distanciamiento entre recipientes fue de 9 m, ocupando un área representativa de 81 m² (figura 53). El área cubierta tenía un ancho equivalente al distanciamiento entre los aspersores y una longitud del doble de la distancia entre los laterales de riego, como se observa en la figura siguiente.

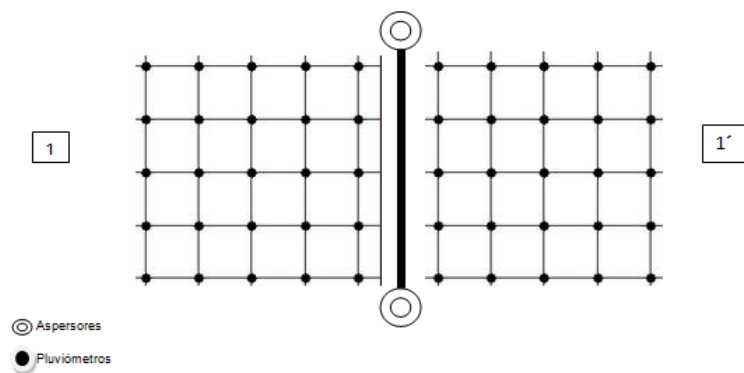




Figura 53. Distribución de recipientes recolectores en campo para prueba de uniformidad de riego

Al concluir el riego cuantificó el volumen de agua recolectado por cada recipiente, registrando la información en la boleta de campo teniendo en cuenta su ubicación espacial (figura 54).


EVALUACIÓN DE UNIFORMIDAD DE RIEGO POR ASPERSIÓN
 Departamento de Ingeniería Agrícola
 Ingenio Santa Ana
 

DATOS GENERALES

Fecha: _____ Región: _____ Finca: _____
 Area (Ha): _____ Lote: _____ Código de Finca: _____
 Fecha de corte ó siembra: _____ Variedad: _____
 Dirección de surcos: _____ Código de motor: _____

DATOS DE CAMPO

DATOS DE ASPERSIÓN	DATOS DE BOMBA
Fecha del último riego: _____	Numero de recipientes: _____
Marco de riego: _____	RPM: _____
Distancia entre aspersores (m): _____	Presión de Salida (PSI): _____
Distancia entre laterales (m): _____	Horometro Inicial: _____
Aspersor: _____	Horometro Final: _____
Altura de Aspersor (m): _____	CAUDALIMETRO
Diametro de boquilla (mm): _____	Caudal acumulado inicial: _____
Diametro de pluviometro (cm): _____	Caudal acumulado final: _____
PRESIÓN DE ASPERSORES	GPM Inicial: _____
Presión inicial aspersor 1 (PSI): _____	GPM Final: _____
Presión inicial aspersor 2 (PSI): _____	TUBERIAS (Diametro en Pulgadas)
Presión final aspersor 1 (PSI): _____	Diametro tubería / Conducción: _____
Presión final aspersor 2 (PSI): _____	No. Tubería / Conducción: _____
RIEGO	Diametro tubería / Principal: _____
Hora inicial: _____	No. Tubería / Principal: _____
Hora Final: _____	Diametro tubería / Lateral: _____
Tiempo de riego (hrs): _____	No. Tubería / Lateral: _____

DATOS METEOROLÓGICOS

Tiempo (min)	15	30	45	60	75	90	105	120
Vel. Viento (Km/hora):								
Dirección:								

PLUVIOMETRIA

Fuente: Sistema de evaluación de uniformidad de riego Santa Ana, 2016

Figura 54. Boleta de campo utilizado para el registro de información de la prueba de uniformidad de riego

En gabinete se simuló la condición final del terreno al concluir un evento de riego en el que por los traslapes entre aspersores se riega un mismo punto por cuatro posiciones de

aspersión distribuyendo distintas láminas de riego lo que al final suma la lámina total de riego aplicado por evento (figura 55).

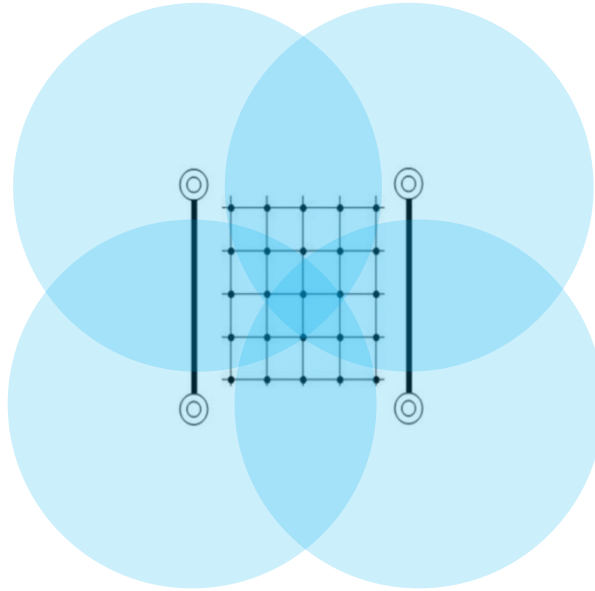


Figura 55. Distribución de recipientes recolectores con 4 aspersores operando

a. Lámina de riego aplicada

Una vez conocido el volumen de agua recolectado en cada recipiente, resultado de la simulación, se determinó la lámina de riego que representaba tal volumen, para lo cual se utilizó la siguiente ecuación.

$$L_{ap} = \frac{\text{Vol. recolectado}}{\pi * (\text{radio de recipiente})^2}$$

La lámina de riego promedio aplicada durante el evento de riego se determinó sumando todas las láminas de agua aplicadas en cada recipiente, resultante de la simulación, dividido el número de recipientes que quedaron después de la simulación, tal como se muestra en la ecuación siguiente.

$$\text{Lámina de riego aplicada} = \frac{\sum_{i=1}^n (L_{ap})}{n}$$

b. Intensidad de riego

La intensidad con que se realizó el riego se determinó dividiendo la lámina de riego aplicada entre el tiempo de riego, obteniéndose en mm/hora.

$$IR = \frac{\text{Lámina de riego aplicada}}{\text{tiempo de riego}}$$

c. Coeficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad de riego se calculó usando el modelo propuesto por Christiansen en 1942.

$$CU = 100 * \left[1 - \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - M|}{M * n} \right]$$

Donde:

X_i =Pluviometría de cada recipiente

M= Pluviometría promedio de todos los recipientes

n= Cantidad de recipientes instalados

Este coeficiente indica el grado de uniformidad con que se desarrolló el riego dentro del área cubierta, basado en la desviación estándar de las láminas cuantificadas (Tarjuelo, 1995), esto significa que la uniformidad de riego determina que tanto las láminas de riego medidas en cada punto de observación se alejan de la lámina media aplicada, cuando su valor es 100 significa que la lámina aplicada en todos los puntos de observación son iguales a la media y un valor cercano a cero significa que hay mucha variación entre la lámina de riego aplicada en cada punto de observación y la lámina media.

d. Uniformidad de distribución

La uniformidad de distribución se obtuvo de la media del 25 % de las pluviometrías menores, a través del modelo siguiente.

$$DU = 100 * \left(\frac{\text{Promedio del 25 \% de pluviometría menor}}{\text{Promedio general de pluviometría}} \right)$$

Cuando el valor de la uniformidad de distribución es igual a 100 significa que no existe diferencia entre la lámina de riego aplicada en los puntos de menor pluviometría y la lámina media aplicada durante el evento de riego, mientras la lámina media del 25 % de la pluviometría más baja se reduce en comparación a la lámina de riego promedio el valor de la uniformidad de distribución también se reducirá, llegando incluso a tener un valor a cero cuando el 25 % de los recipientes no recolectaron agua proveniente del riego.

I. Monitoreo de indicadores de crecimiento

Para uniformizar y facilitar la medición dentro de las unidades experimentales se establecieron cuatro puntos de medición por unidad experimental (figura 56). Cada punto se diseñó para tener una longitud de 10 m constituido por dos surcos. Por punto se seleccionaron e identificaron 10 plantas a las cuales se les dio seguimiento midiéndoles la altura y la longitud de entre nudos (figura 57). Las mediciones se realizaron cada 30 días, iniciando después del último riego de brotación.

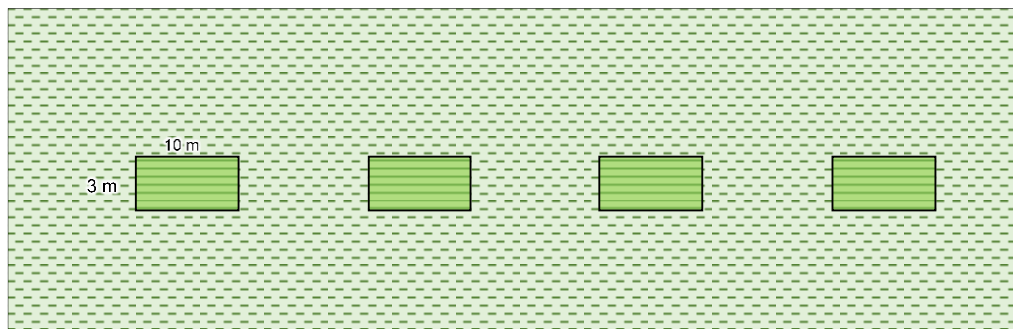


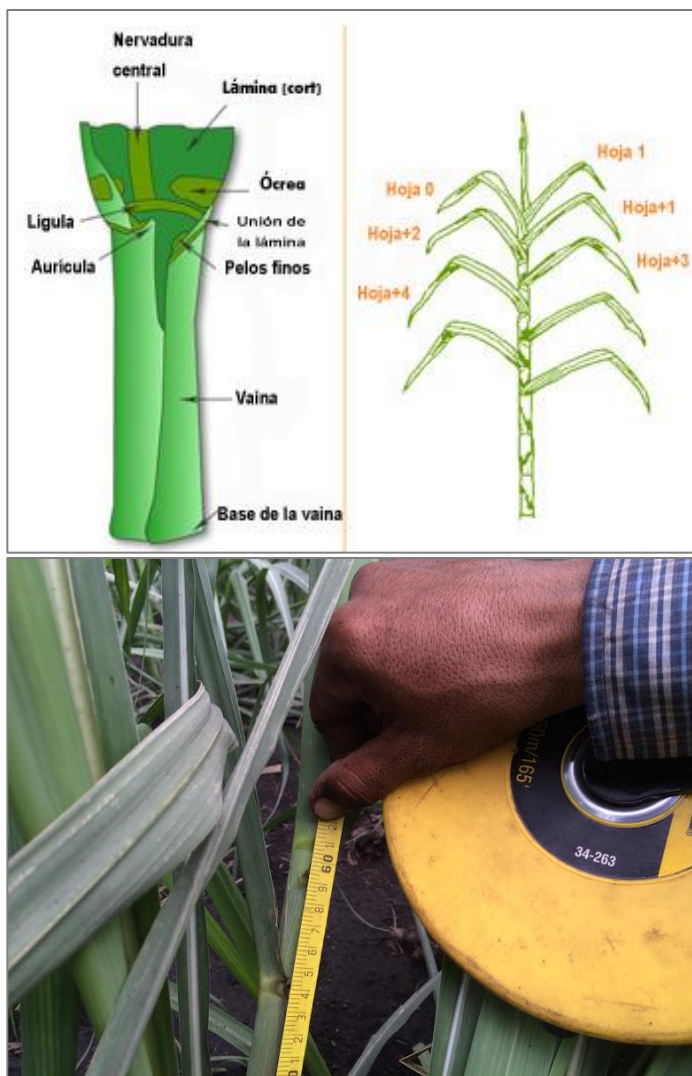
Figura 56. Distribución de puntos de medición por unidad experimental



Figura 57. Identificación de plantas medición de altura y longitud de entrenudos

a. Altura de caña

La altura se determinó midiendo la longitud de la caña desde la base del suelo hasta la última lígula visible, vista de abajo hacia arriba (figura 58).



Fuente: NETAFIM, 2016

Figura 58. Ubicación de lígula en hoja de caña de azúcar

b. Densidad poblacional

Para determinar este indicador se contó el número de tallos encontrados en los dos surcos de 10 m de longitud ubicados dentro de cada punto de medición, para luego dividirse entre la longitud de los surcos, determinando así la densidad poblacional por metro.

c. Longitud de entrenudos

Este indicador se determinó midiendo la longitud del entrenudo que se encontraba a la mitad de la altura de la caña en el momento de la medición (figura 59), esto significa que por cada medición se tomó un entrenudo diferente, a pesar de que la medición se le realizara a la misma planta.

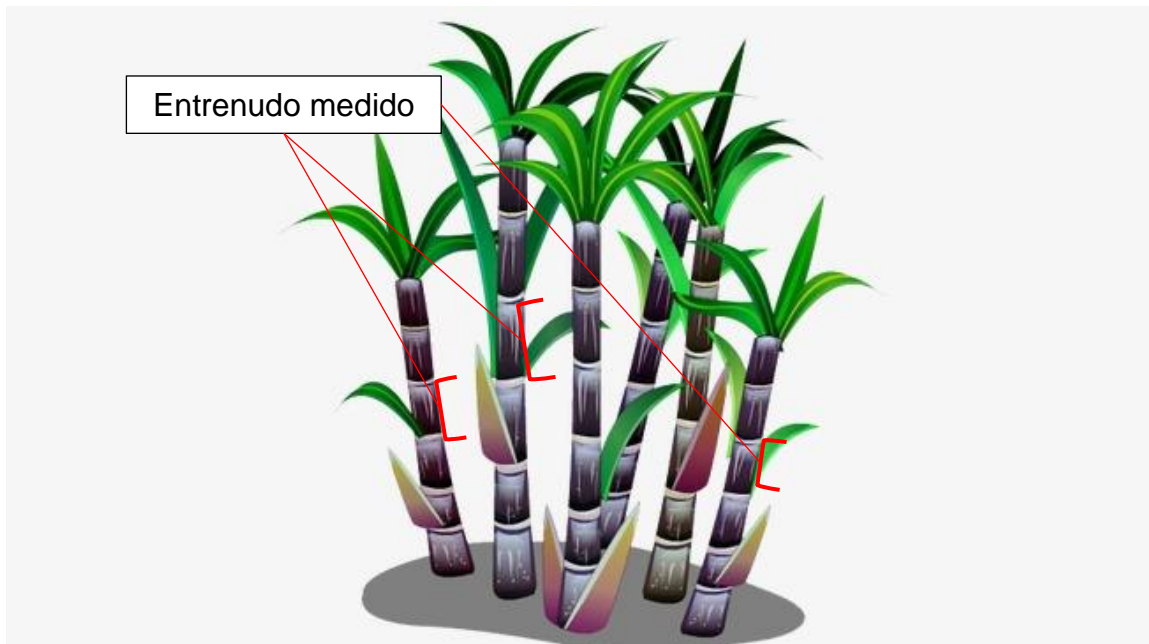


Figura 59. Medición de longitud de entrenudo según la altura de la caña

J. Medición de variables respuesta

a. Producción de caña por hectárea

Esta variable se midió al cosecharse la caña en cada unidad experimental. Se coordinó la cosecha teniendo cuidado que se cargara solo caña de cada unidad experimental. Se registró el área requerida para llenar cada jaula, y con el peso obtenido a través de las básculas instaladas en fábrica, se determinó la producción de caña por hectárea de cada unidad experimental, por el diseño de las unidades experimentales se extrajeron 3 jaulas por tratamiento en cada localidad.

b. Producción de azúcar por hectárea

Cinco días antes de la cosecha se realizó el muestreo precosecha para el análisis de jugos. El muestreo se hizo seleccionando aleatoriamente 4 puntos de muestreo dentro de cada

unidad experimental, en cada punto se muestrearon 5 cañas identificando brotes, caña moledera y caña con flores. Las muestras obtenidas fueron pesadas y llevadas a CENGICAÑA para su análisis. Las variables medidas por CENGICAÑA fueron: pol, brix, y pureza del jugo, el rendimiento comercial y rendimiento real. Con la concentración de azúcar obtenida por tonelada de caña y la producción de caña por hectárea se estimó la producción de azúcar por hectárea producida.

2.5.3 Análisis de información

A. Seguimiento de los indicadores de crecimiento

Los indicadores de crecimiento medidos fueron: altura de caña, densidad poblacional y longitud de entrenudos. Estos sirvieron para dar seguimiento al crecimiento de la caña en cada unidad experimental, observando el efecto que tiene el riego sobre el desarrollo fenológico de la caña.

Con la información recopilada se generó una base de datos, la cual se consultó para estimar la etapa fenológica en la que se encontraba el cultivo. Con la información recopilada de la altura de caña se determinó la tasa de crecimiento, y junto con la densidad poblacional se estimó la etapa fenológica del cultivo, indispensable para la planificación del riego.

B. Producción de caña y azúcar por hectárea

La información obtenida de producción de caña por hectárea y producción de azúcar por hectárea se le realizó el análisis de T de Student para dos muestras independientes, basado en el estadístico t, para cada localidad.

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{(n-1) * \hat{S}_1^2 + (m-1) * \hat{S}_2^2}{n+m-2} * \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m}\right)}}$$

Donde \bar{X} y \bar{Y} son las medias de cada uno de los tratamientos, \hat{S}_1^2 y \hat{S}_2^2 denotan las cuasivarianzas muestrales para cada tratamiento, m y n representan el número de individuos evaluados para cada tratamiento.

Con los resultados del análisis de T de Student para dos muestras independientes se determinó la existencia de diferencia estadística entre el testigo relativo y el balance hídrico.

El análisis se realizó por localidad ya que las condiciones en las que se desarrolló la investigación eran distintas, tanto de suelo como meteorología, lo que varía los resultados obtenidos.

C. Análisis económico

Para el desarrollo del análisis económico se cuantificó el costo de la labor de riego por hectárea y los ingresos que generó la producción de azúcar en cada tratamiento, dentro de cada localidad.

El costo de la labor de riego se determinó basándose en el área regada por cambio y el número de cambios realizados para regar una hectárea, estimándose las horas de labor requeridas para llevar a cabo un evento de riego. Conociéndose el número de eventos realizado por unidad experimental se determinaron las horas de labor realizadas durante el ciclo productivo. Al tomarse en cuenta el costo por hora de la labor de riego se determinó el costo de la labor de riego por ciclo productivo por hectárea en cada unidad experimental.

El ingreso se determinó teniendo en cuenta la producción de caña por hectárea, la concentración de azúcar por tonelada de caña, y las pérdidas producidas durante la extracción de azúcar en fábrica, con lo que se estimó la producción total de azúcar por hectárea producida. Al conocerse el precio del azúcar se determinó el ingreso total obtenido por hectárea en cada unidad experimental.

Para el análisis económico se usó la metodología presupuestos parciales. Esta metodología toma en consideración los costos asociados a la decisión de usar o no un tratamiento, ya que estos costos permiten diferenciar un tratamiento de otro. El resto de los costos no se ven afectados por la decisión de usar un tratamiento en particular, y pertenecen constantes (Reyes, 2001). En la investigación los costos asociados a cada tratamiento fueron los costos de la labor de riego, mientras el costo del resto de las labores se mantuvo constante, denominándose costos fijos. Conociéndose el costo de la labor de riego y el ingreso obtenido por hectárea se pudo determinar la utilidad parcial de cada tratamiento por localidad, con lo que se identificó el tratamiento que maximiza las ganancias en cada localidad.

2.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La investigación se desarrolló para determinar el efecto de dos programaciones de riego sobre el rendimiento de la caña de azúcar. Una de estas programaciones de riego implica monitorear la humedad del suelo a través de un balance hídrico, siendo necesario caracterizar el cultivo, el suelo y las condiciones meteorológicas para determinar el comportamiento de la humedad en las tres localidades donde se estableció la investigación.

2.6.1 Cultivo

La información recopilada del cultivo consistió en la fecha de siembra, duración de las etapas fenológicas, profundidad radicular y coeficiente del cultivo (K_c) en cada etapa fenológica, como se observa en el cuadro 15.

Cuadro 15. Fecha de siembra, corte y duración del ciclo productivo de la caña en las localidades estudiadas

Lote	Finca	Fecha de siembra	Fecha de corte	Duración de ciclo	
				Día	Mes
521	Agrícola del Sur	24/12/2015	20/11/2016	332	11.07
14	La Prosperidad	24/12/2015	19/11/2016	331	11.03
221A	California	27/12/2015	03/12/2016	342	11.40

Las tres localidades se sembraron para el primer tercio de la zafra, cosechándose 11 meses después. Para el desarrollo de un balance hídrico se tomó de base la duración de las etapas fenológicas propuesta por Castro (2011), al igual que la profundidad radicular y el coeficiente del cultivo (figura 16).

Cuadro 16. Fecha de finalización de etapas fenológicas de la caña en localidades estudiadas

Etapa	Duración	K_c	Profundidad Radicular (cm)	Fecha de finalización de etapa fenológica		
				Finca Agrícola del Sur Lote 521	Finca La Prosperidad Lote 14	Finca California Lote 221A
Iniciación	45	0.4	30	07/02/2016	07/02/2016	10/02/2016
Macollamiento	90	0.6	40	07/05/2016	07/05/2016	10/05/2016
Elongación	180	1	60	03/11/2016	03/11/2016	06/11/2016
Maduración	50	0.6	60	23/12/2016	23/12/2016	26/12/2016

En comparación con otros autores se puede observar cierta diferencia en la duración de las etapas fenológicas, Cassalett, Torres e Isaacs (1995) afirman que en Colombia el

macollamiento comienza 3 meses después de la siembra, al quinto mes la población se estabiliza y la tasa de crecimiento aumenta, dando lugar a la etapa de elongación, esto mismo reporta Pardo y Proaño (2008), para Ecuador indicando que la elongación dura entre 5 a 9 meses después de la siembra y la maduración entre 9 a 12 meses. Para Guatemala Juárez y Muñoz (1998) reportan que la etapa de crecimiento dura entre 25 a 30 días, el macollamiento 60 días, sumando 90 días, después del cual inicia la etapa de elongación cuya duración se encuentra entre 220 a 235 días, concluyendo con la maduración de 30 días de duración.

2.6.2 Suelo

Del muestreo realizado se determinaron las características físicas del suelo, requeridas para el diseño agronómico de los tratamientos.

Cuadro 17. Características físicas del suelo en localidades estudiadas

Identificación	Finca	Lote	Profundidad	Ingenio	No. Lab	Arcilla	Limo	Arena	Textura	PMP	CC	Dap
						%				% H	g/cm ³	
09-1-1.2b-14	California	221 A	0-20	Santa Ana	S-4107-11-15	16.77	28.63	54.60	Franco arenoso	12.34	25.87	1.16
09-1-1.2b-14	California	221 A	20-40	Santa Ana	S-4113-11-15	18.34	30.39	51.28	Franco	12.87	26.53	1.17
09-1-1.2b-14	California	221 A	40-60	Santa Ana	S-4117-11-15	26.56	36.64	36.80	Franco	14.41	29.05	1.11
09-1-1.12B-14	Prosperidad	14	0-20	Santa Ana	S-4216-12-15	16.36	18.22	65.43	Franco arenoso	16.62	26.54	1.13
09-1-1.12B-14	Prosperidad	14	20-40	Santa Ana	S-4220-12-15	14.55	18.33	67.11	Franco arenoso	15.32	26.95	1.07
09-1-1.12B-14	Prosperidad	14	40-60	Santa Ana	S-4221-12-15	12.55	12.35	75.10	Franco arenoso	13.21	21.92	1.11
09-1-1.2b-14	Agrícola del Sur	521	0-20	Santa Ana	S-251-01-16	14.62	24.85	60.53	Franco arenoso	22.56	41.55	0.89
09-1-1.2b-14	Agrícola del Sur	521	20-40	Santa Ana	S-249-01-16	14.64	24.99	60.37	Franco arenoso	24.56	40.42	0.80
09-1-1.2b-14	Agrícola del Sur	521	40-60	Santa Ana	S-250-01-16	10.47	18.64	70.88	Franco arenoso	19.86	33.27	0.89

En Agrícola del Sur la densidad aparente del suelo se mantuvo entre 0.8 a 0.89 g/cm³, la más baja entre las tres localidades, cuyo valor de densidad aparente estuvo cercano a 1.1 g/cm³, sin embargo, la capacidad de retención de agua fue superior en el primer estrato con una diferencia de humedad de 20 % entre la CC y PMP, reduciéndose al profundizar. California presentó una capacidad de retención de agua intermedia, entre 13.5 a 14.5 % de la humedad del suelo, siendo La Prosperidad la que presentó la menor capacidad de retención de agua con diferencias de 8.7 hasta 11.6 % de humedad entre CC Y PMP.

a. Características del aspersor

En las tres localidades se utilizaron los aspersores Komet Twin 101, con boquilla de 24 mm de diámetro, presión de operación de 50 psi, descarga de 11.5 l/s y diámetro de mojado de

86 m (cuadro 18). El distanciamiento entre laterales y aspersores fue de 45 m, con 95 % de traslape e intensidad de riego de 20.44 mm/h.

Cuadro 18. Características técnicas de aspersor Komet Twin 101

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ASPERSOR	
Marca de Aspersor:	Komet Twin 101
Descarga de aspersor en l/s a 50 psi:	11.5
Diámetro de boquilla:	24 mm
Marco de riego (m):	45 x 45
Intensidad de riego (mm/h):	20.44

b. Tiempo y frecuencia de riego base

Agrícola del Sur retiene en los primeros 20 cm de profundidad 33 mm de agua, reduciéndose a 24 mm en el estrato de 40 a 60 cm. La Prosperidad presentó una retención de humedad baja, con 19 mm de capacidad en el estrato de 40 a 60 cm, en cambio California mantuvo su capacidad de retención a 31 mm en los tres estratos evaluados.

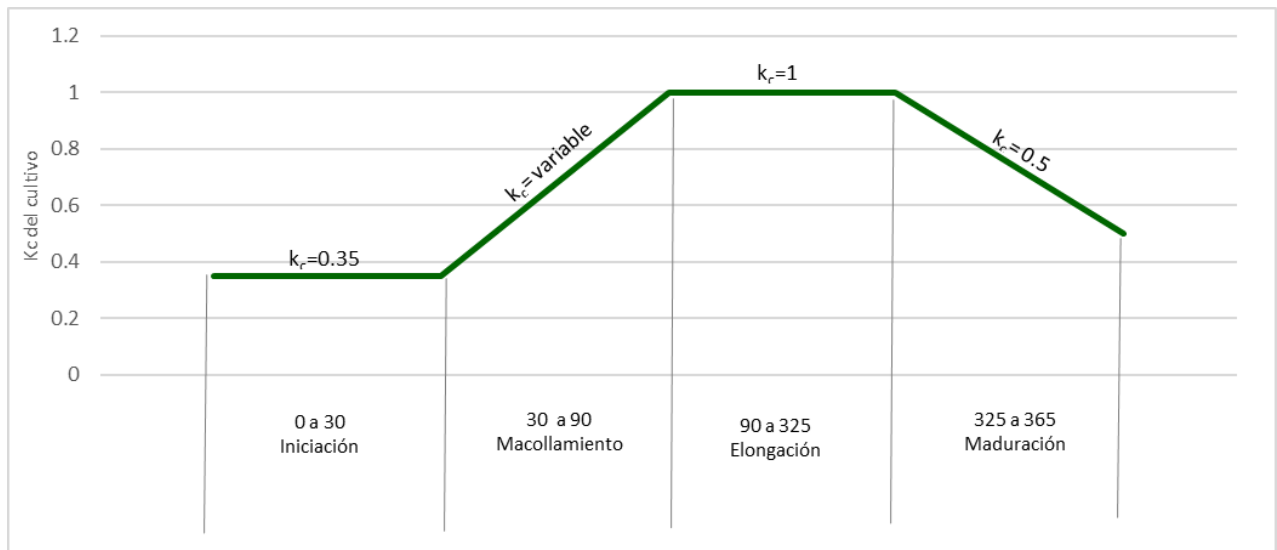
Cuadro 19. Determinación de tiempo y frecuencia de riego base para las localidades estudiadas

FINCA	PANTE	Etapas fenológica	Duración Teórica	Fecha Inicio Teórica	Fecha final Teórica	LAA	LAA PROF.	LAA (mm)	umbral (%)	LARA (mm)	LB (mm) 80%	Tiempo riego (hr) IR=20.44 mm/h	Kc	Eto (mm/día)	Etm. (kc*Eto.) mm/día	FR (días)
California	221 A	Iniciación	45	27/12/2015	10/02/2016	1.57	31.40	31.40	0.6	19	23.55	1.15	0.30	4.22	1.27	15
		Macollamiento	90	10/02/2016	10/05/2016	1.57	31.40	63.30	0.6	38	47.47	2.32	0.60	4.84	2.90	13
		Elongación	180	10/05/2016	06/11/2016	1.59	31.89	95.86	0.6	58	71.90	3.52	0.90	4.74	4.27	13
		---	---	---	---	1.63	32.57	---	---	---	---	---	---	---	---	---
La Prosperidad	14	Iniciación	45	24/12/2015	07/02/2016	1.12	22.42	22.42	0.6	13	16.81	0.82	0.30	5.61	1.68	8
		Macollamiento	90	07/02/2016	07/05/2016	1.12	22.42	47.25	0.6	28	35.43	1.73	0.60	4.91	2.95	10
		Elongación	180	07/05/2016	03/11/2016	1.24	24.83	66.64	0.6	40	49.98	2.45	0.90	4.93	4.44	9
		---	---	---	---	0.97	19.40	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Agrícola del Sur	521	Iniciación	45	24/12/2015	07/02/2016	1.68	33.68	33.68	0.6	20	25.26	1.24	0.30	4.22	1.27	16
		Macollamiento	90	07/02/2016	07/05/2016	1.68	33.68	59.10	0.6	35	44.32	2.17	0.60	4.74	2.84	12
		Elongación	180	07/05/2016	03/11/2016	1.27	25.42	83.08	0.6	49.85	62.31	3.05	0.90	4.93	4.44	11
		---	---	---	---	1.20	23.98	---	---	---	---	---	---	---	---	---

A una profundidad de 60 cm los suelos de Agrícola del Sur logran retener a capacidad de campo una lámina de 83 mm, mientras que en La Prosperidad solo retiene 66 mm y California supera a las anteriores reteniendo hasta 95 mm de agua. A pesar de que las localidades presenten la misma textura su capacidad de retención varía grandemente, lo que afecta la toma de decisión sobre el tiempo y frecuencia con que se aplica el riego, al igual que la resistencia del cultivo a una sequía prolongada, debido a la disponibilidad de agua en el suelo.

2.6.3 Dinámica de la humedad en el suelo

Las bases utilizadas para analizar la distribución de lluvias y riego según las etapas fenológicas se tomaron de Juárez y Muñoz (1998) (figura 60). Indican que la etapa de iniciación tiene una duración de 30 días, con K_c de 0.35, la etapa de macollamiento inicia 30 días después de la siembra (D.D.S.) y finaliza 90 D.D.S., presentando un K_c variable y la elongación inicia 90 D.D.S. con un K_c de 1.



Fuente: Juárez y Muñoz, 1998

Figura 60. Duración de etapa fenológica y K_c del cultivo propuesto por Juárez y Muñoz

Entre localidad la precipitación varió entre 3,199 mm en Agrícola del Sur y 1,565 mm en La Prosperidad, registrando el inicio de la época lluviosa entre 122 a 144 días después de la siembra (D.D.S.) pudiendo observarse que en las etapas de iniciación y macollamiento no existió registro de lluvia, significando que la lluvia se distribuyó entre las etapas de elongación y maduración, siendo finca California la que reportó mayor lámina de lluvia acumulada durante esta etapa, con 125 mm (cuadro 20).

Cuadro 20. Distribución de lluvias y riego por etapa fenológica en los tratamientos y localidades evaluadas

Estrato Localidad Finca Tratamiento	Medio Localidad 1 Agrícola del Sur		Bajo Localidad 2 La Prosperidad		Litoral Localidad 3 California	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2
Fecha de siembra	24-dic-15		24-dic-15		27-dic-15	
Fecha de cosecha	20-nov-16		19-nov-16		3-dic-16	
Duración de ciclo (días)	332 (11.1 meses)		331 (11.0 meses)		342 (11.4 meses)	
Altitud (m s.n.m.)	164		29		19	
Precipitación total en el ciclo (mm)	3,199		1,565		2,171	
Estimación D.D.S. inicio lluvias	122		144		139	
D.D.S. de lluvias durante periodo seco	85, 112, 114, 115, 116		114, 131,134, 138, 142		122, 123, 124, 128, 130, 131, 132	
Precipitación durante la época seca (mm)	1, 8, 5, 50, 23		0.5, 11.5, 42, 4.6, 10		3, 3, 0.6, 28.7, 1.1, 43.5, 1.7	
PP total en iniciación y macollamiento (mm)	1		0		0	
PP en elongación durante época seca (mm)	86		69		82	
PP total en elongación (mm)	3,128.7		1,513		2,046	
PP total en maduración (mm)	69.7		52		125	
No. Riegos aplicados	7	7	8	11	5	8
D.D.S. de riegos de iniciación	1,10	1,10	1,19	1,19	1,16	1,16
D.D.S. de riegos de macollamiento	35,57,75	35,56,74	40,58,78	41,53,63,74	45,60	45,65,75
D.D.S. de riegos de elongación	84,108	89,104	96,106,128	88,99,108,118,127	117	92,105,124
Lamina total de riego (mm)	382	374	314	497	250	369
Lamina aplicada por riego en iniciación (mm)	122	122	126	125	94	94
Lamina aplicada por riego en macollamiento (mm)	168	175	125	199	111	142
Lamina aplicada por riego en elongación (mm)	92	77	63	173	45	133
Profundidad de nivel freática en época seca (m)	-	-	-	-	1.1	1.04

Referencias:

*D.D.S: Días después de la siembra

*T1: Testigo relativo

*T2: Balance hídrico

En las tres localidades se registraron dos riegos en la etapa de iniciación, siendo esta, parte del riego de establecimiento. en cambio, durante la etapa de macollamiento y elongación el número de riegos aplicados por tratamiento fue variable.

A. Agrícola del Sur

En esta localidad se aplicaron tres riegos en ambos tratamientos durante la etapa de macollamiento y otros dos en la etapa de elongación sumando siete riegos por ciclo, aplicando una lámina de agua de 382 mm en el testigo relativo y 373 mm en el tratamiento con balance hídrico, la diferencia entre los tratamientos fue inferior a 10 mm, siendo insuficiente para considerar que existió diferencia entre el manejo dado a cada tratamiento, atribuyendo esta diferencia a la variabilidad climática y la metodología utilizada para medir la lámina aplicada en cada evento de riego.

El requerimiento total de agua del cultivo fue de 1,015 mm (cuadro 21). En la etapa de iniciación ambos tratamientos se regaron con mayor lámina de agua que la requerida, lo

que aumentó el K_c a 1.2 cuando el cultivo presentaba un K_c de 0.4; la etapa de iniciación se regó con la lámina de agua necesaria para suplir los requerimientos del cultivo y en ambos tratamientos el K_c con el que se ejecutó el riego fue de 0.7 y en la etapa de elongación, durante la época seca, el riego se realizó para un K_c de 1.1 y 1 para ambos tratamientos.

Cuadro 21. Evapotranspiración, precipitación y riego en tratamientos de finca Agrícola del Sur

LOCALIDAD	TRAT	Variables	Iniciación	Macollamiento	Elongación época seca	Epoca seca	Elongación total	Maduración	Total
Localidad 1	T1 - Testigo relativo	Eto	102	254	134	489	903	29	1,287
		$E_{t_{max}}$	41	141	80	262	816	17	1,015
		Lamina de riego	122	168	92	382	92	-	382
		PP efectiva	-	1	61	62	2190	49	2,240
		Lamina recibida	122	169	153	444	2282	49	2,622
		K (E _{tmax} /Eto)	0.4	0.6	0.6	0.5	0.9	0.6	0.8
		K (LR/Eto)	1.2	0.7	1.1	0.9	2.5	1.7	2.0
	T2 - Balance hídrico	Eto	102	254	134	489	903	29	1,287
		$E_{t_{max}}$	41	141	80	262	816	17	1,015
		Lamina de riego	122	175	77	374	77	-	374
		PP efectiva	-	-	61	61	2191	49	2,240
		Lamina recibida	122	175	138	435	2268	49	2,614
		K (E _{tmax} /Eto)	0.4	0.6	0.6	0.5	0.9	0.6	0.8
		K (LR/Eto)	1.2	0.7	1.0	0.9	2.5	1.7	2.0

En el cuadro anterior se observa que la distribución del riego en ambos tratamientos fue similar en cada una de las etapas fenológicas, ya que el requerimiento hídrico del cultivo estimado con el balance hídrico, utilizado para regar el segundo tratamiento, coincidió con el manejo del riego en el testigo relativo, por lo que a nivel de manejo no existió diferencia entre el testigo relativo y el balance hídrico.

B. La Prosperidad

En La Prosperidad se aplicaron tres riegos en el testigo relativo y cuarto en el balance hídrico durante la etapa de macollamiento, en la etapa de elongación se aplicaron tres y cinco riegos, respectivamente a cada tratamiento, aplicándole al testigo relativo 8 riegos y al balance hídrico 11, equivalente a 314 y 497 mm de agua durante la época de riego.

El requerimiento hídrico del cultivo durante el ciclo productivo fue de 1,197 mm, en la etapa de iniciación se regó con un K_c de 1.1 en ambos tratamientos, siendo el requerimiento del cultivo de 0.4, existiendo un exceso de riego durante este período; en la etapa de macollamiento el K_c con que se regó el testigo relativo fue de 0.4, siendo inferior a 0.6, existiendo un déficit de riego para este tratamiento, en cambio, para el tratamiento con

balance hídrico el riego se aplicó según lo recomendado; en los primeros días de la etapa de elongación se regó con un K_c de 0.4 el testigo relativo y 0.8 en el tratamiento con balance hídrico, cuando el requerimiento medio del cultivo fue de 0.7, de esta forma se determinó que para el primer tratamiento existió un déficit de riego y en el segundo un exceso.

Cuadro 22. Evapotranspiración, precipitación y riego en tratamientos de finca La Prosperidad

LOCALIDAD	TRAT	Variables	Iniciación	Macollamiento	Elongación época seca	Epoca seca	Elongación total	Maduración	Total
Localidad 2	T1 - Testigo relativo	Eto	118	307	258	684	1065	28	1,518
		$E_{t_{max}}$	48	171	171	390	961	17	1,197
		Lamina de riego	126	125	65	316	63	-	314
		PP efectiva	-	-	34	34	1059	36	1,096
		Lamina recibida	126	125	99	350	1122	36	1,410
		$K (E_{t_{max}}/E_{to})$	0.4	0.6	0.7	0.6	0.9	0.6	0.8
		$K (LR/E_{to})$	1.1	0.4	0.4	0.5	1.1	1.3	0.9
	T2 - Balance hídrico	Eto	118	307	258	684	1065	28	1,518
		$E_{t_{max}}$	48	171	171	390	961	17	1,197
		Lamina de riego	125	199	173	497	173	-	497
		PP efectiva	-	-	34	34	1059	36	1,096
		Lamina recibida	125	199	207	531	1232	36	1,593
		$K (E_{t_{max}}/E_{to})$	0.4	0.6	0.7	0.6	0.9	0.6	0.8
		$K (LR/E_{to})$	1.1	0.6	0.8	0.8	1.2	1.3	1.0

La distribución y manejo del riego en esta localidad varió por tratamiento, pudiendo observar que el manejo dado al testigo relativo no satisfacía los requerimientos hídricos del cultivo, en cambio, el manejo del riego en el tratamiento con balance hídrico permitió proveerle al cultivo la cantidad de agua que requería en cada etapa fenológica, siendo así que el K_c de la ejecución del riego no bajó del recomendado para cada etapa fenológica.

C. California

En esta localidad al testigo relativo se le aplicaron 5 riegos consumiendo un total de 250 mm de agua, distribuidos en las tres primeras etapas fenológicas, pudiendo satisfacer el requerimiento del cultivo con un coeficiente K_c de 0.8 para la iniciación, 0.4 en macollamiento y 0.5 en la etapa de elongación. En cambio, en el tratamiento con balance hídrico se le aplicaron 8 riegos durante el ciclo productivo, aplicando 369 mm de agua, pudiendo regar en la etapa de iniciación con un K_c de 0.8, macollamiento con 0.5 y elongación con 0.9, manteniéndose cercano al requerimiento hídrico del cultivo para cada etapa fenológica.

La evapotranspiración potencial en esta localidad sumó 1,416 mm de agua durante el ciclo del cultivo, siendo el requerimiento hídrico del cultivo de 1,097 mm, intermedio al obtenido

en finca Agrícola del Sur, con un requerimiento de 1,015 mm, y finca La Prosperidad, con 1,197 mm.

Cuadro 23. Evapotranspiración, precipitación y riego en tratamientos de finca La Prosperidad

LOCALIDAD	TRAT	Variables	Iniciación	Macollamiento	Elongación época seca	Epoca seca	Elongación total	Maduración	Total
Localidad 3	T1 - Testigo relativo	Eto	123	278	205	605	945	70	1416
		Et _{max}	49	153	129	331	853	42	1097
		Lamina de riego	94	111	45	250	45	-	250
		PP efectiva	-	-	57	57	1432	87	1520
		Lamina recibida	94	111	102	307	1477	87	1770
		K (E _{tmax} /E _{to})	0.4	0.6	0.6	0.5	0.9	0.6	0.8
		K (LR/E _{to})	0.8	0.4	0.5	0.5	1.6	1.2	1.3
		Eto	123	278	205	605	945	70	1416
	T2 - Balance hídrico	Et _{max}	49	153	129	331	853	42	1097
		Lamina de riego	94	142	133	369	133	-	369
		PP efectiva	-	-	57	57	1432	87	1520
		Lamina recibida	94	142	190	426	1565	87	1889
		K (E _{tmax} /E _{to})	0.4	0.6	0.6	0.5	0.9	0.6	0.8
		K (LR/E _{to})	0.8	0.5	0.9	0.7	1.7	1.2	1.3

El testigo relativo recibió durante la época seca 250 mm de agua procedentes del riego y 57 mm de lluvias, sumando un total de 307 mm de agua, inferior a los 426 mm de agua recibidos por el tratamiento con balance hídrico, reflejando que existió una diferencia entre el manejo del riego dado en el testigo relativo y el tratamiento con balance hídrico.

a. Monitoreo de capa freática

En esta localidad se observó que la capa freática se encontraba a una profundidad inferior a dos metros (figura 61), afectando el contenido de agua del suelo tal como menciona Castro (2007), Torres (2016) e Illescas (2014), ya que a estas profundidades las moléculas de agua pueden ascender hasta la zona radicular a través de los microporos del suelo modificando el contenido de humedad.

A través de tubos piezométricos instalados dentro del lote se registró la profundidad a la que se encontraba la capa freática. En la primera medición realizada el 13 de febrero de 2016 la capa freática se encontraba a una profundidad de 0.83 metros, 49 D.D.S., manteniéndose a esa profundidad hasta 98 D.D.S. para descender a 1.6 m a los 119 D.D.S. y aumentar nuevamente con el inicio de la lluvia a 154 D.D.S. hasta llegar a 0.7 cm de profundidad.

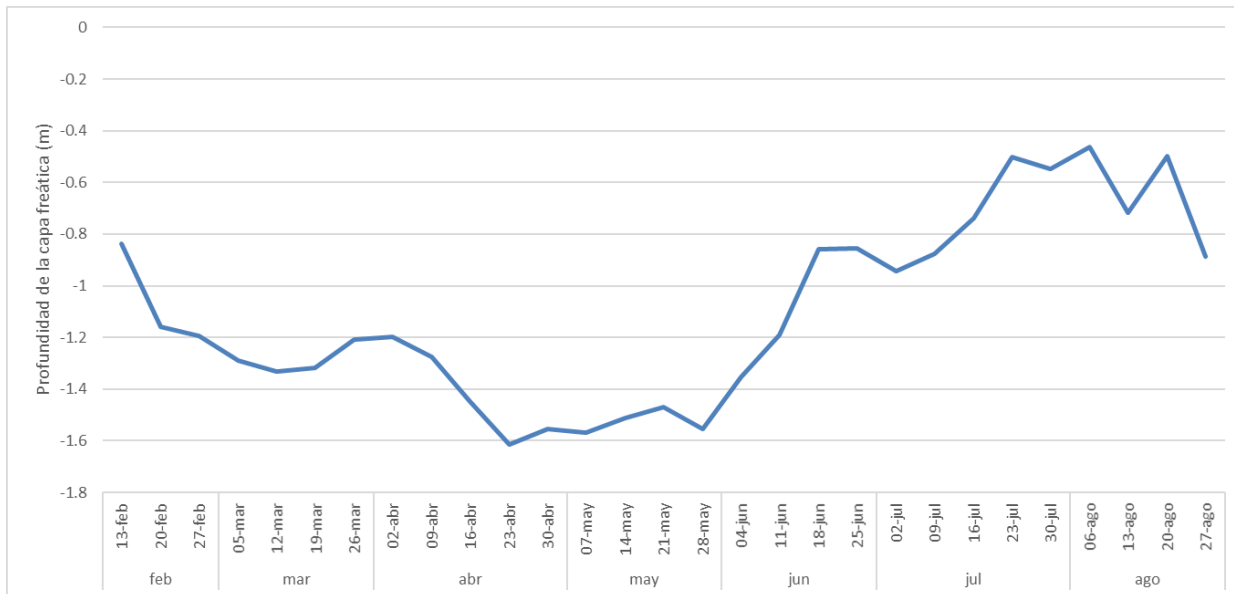


Figura 61. Dinámica de la capa freática dentro del lote 221A de finca California

En las tres localidades se observó que el número de riego aplicado en cada etapa fenológica no varía en las primeras dos etapas fenológicas, en la etapa de iniciación en todas las localidades se aplicaron dos riegos y en la etapa de macollamiento en promedio se aplicaron tres riegos, solo en la etapa de elongación se observó una variación en el número de riegos, pasando desde 1 hasta 5 riegos aplicados en esta etapa, lo que repercute en la lámina de agua aplicada a través del riego en esta etapa, teniendo en cuenta que durante la elongación se produce la mayor tasa de crecimiento en el cultivo es lógico pensar que la aplicación del riego en esta etapa repercute en el tonelaje final a obtener en la cosecha.

D. Comportamiento de la evapotranspiración

Por las condiciones meteorológicas predominantes en cada localidad la evapotranspiración de referencia media registrada varió desde 3.84 mm/día, en finca Agrícola del Sur, hasta 4.52 mm/día, en La Prosperidad, siendo en esta última donde se registró la mayor evapotranspiración potencial, sumando 1,519 mm durante todo el ciclo del cultivo.

Durante el mes de febrero se registró la mayor evapotranspiración media mensual en las tres localidades, debido al aumento en la velocidad del viento, llegando a registrar valores de evapotranspiración de hasta 8.97 mm/día, entre el 7 y 10 de febrero de 2016; en cambio,

los valores de evapotranspiración más bajos registrados se obtuvieron el 18 de octubre del mismo año con valores inferiores a 1.97 mm/día.

Cuadro 24. Evapotranspiración de referencia media diaria y acumulado mensual por localidad

AÑO	MES	Agrícola del Sur		La Prosperidad		California	
		mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes
2015	12	3.60	29	3.94	32	4.05	20
2016	1	3.48	108	4.14	128	4.13	128
	2	4.57	132	5.76	167	5.03	146
	3	3.91	121	4.60	143	4.23	131
	4	4.18	125	5.00	150	4.33	130
	5	3.78	117	4.47	139	4.09	127
	6	3.71	111	4.21	126	3.75	112
	7	4.02	125	4.84	150	4.12	128
	8	4.01	124	4.61	143	4.14	128
	9	3.71	111	4.45	133	3.90	117
	10	3.67	114	4.31	134	3.91	121
	11	3.45	69	3.92	74	3.86	116
	12					3.73	11
ETo por ciclo (mm):		1,287		1,519		1,416	
Máxima (mm/día):		6.82		8.97		6.68	
Mínima (mm/día):		1.97		1.84		1.7	
Promedio (mm/día):		3.84		4.52		4.10	

2.6.4 Validación del balance hídrico con sondas FDR

Durante el periodo de medición se tomaron 29 registros de humedad por cada uno de los 6 puntos establecidos determinando que la variación media de las estimaciones realizadas con el balance hídrico respecto a las mediciones realizadas con la sonda FDR fueron inferiores a 3.77 mm de agua, representando una variación porcentual máximo de 14 %, en las primeras dos localidades (cuadro 25); en cambio, en finca California, donde la capa freática se encontraba a menos de dos metros de profundidad, se pudo constatar que el balance hídrico subestimó la humedad en el suelo en una media de 15 mm, representando una variación porcentual de hasta 25 %.

Cuadro 25. Variación de las estimaciones realizadas con el balance hídrico respecto a las lecturas de la sonda FDR

Localidad	Finca	Código de sensor	Tratamiento	Variación de BH contra FDR* (mm)	Variación porcentual**	Variación media por localidad
1	Agrícola del Sur	S_36	Testigo relativo	-0.84	10.5 %	9.7 %
		S_37	Balance hídrico	-1.77	8.8 %	
2	La Prosperidad	S_38	Testigo relativo	-3.77	14.0 %	13.0 %
		S_39	Balance hídrico	-3.35	11.9 %	
3	California	S_40	Testigo relativo	-15.42	22.3 %	23.7 %
		S_41	Balance hídrico	-15.31	25.0 %	

* Variación de la estimación de humedad realizada con el Balance hídrico en comparación a las mediciones realizadas con la sonda FDR

**Obtenida como resultado de la ecuación $100 \cdot (BH - FDR) / BH$

Al realizar la distribución de frecuencia a los resultados obtenidos se determinó que existe subestimación en el contenido de humedad al utilizar el balance hídrico, llegando a tener diferencias sobre 30 mm respecto a las mediciones realizadas con la sonda FDR (cuadro 26). Sin embargo, el 68 % de estos registros no se alejan más de 5 mm respecto a las mediciones con sonda FDR, y 83 % se encuentra entre un rango de variación de -10 hasta 10 mm.

Cuadro 26. Distribución de frecuencia de variaciones entre estimaciones del balance hídrico y las mediciones con sonda FDR

Variación de datos FDR-BH	Variación de datos (mm)	Frecuencia de datos	Frecuencia porcentual	Frecuencia acumulada
-35	menor a -35	0	0%	0%
-30	-35 a -30	3	2%	2%
-25	-30 a -25	6	3%	5%
-20	-25 a -20	10	6%	11%
-15	-20 a -15	11	6%	17%
-10	-15 a -10	17	10%	27%
-5	-10 a -5	39	22%	49%
0	-5 a 0	54	31%	80%
5	0 a 5	26	15%	95%
10	5 a 10	8	5%	100%
15	mayor a 10	0	0%	100%
Total:		174		

Berengena (2015) y Ruiz (2010) indican que la sonda FDR sobreestima el contenido de humedad en el suelo con un error inferior a 3.4 %, reduciéndose hasta 1 % cuando se encuentra debidamente calibrada, en cambio, Castro (2012) menciona que la precisión en las mediciones se reduce cuando estas se realizan en suelos muy secos o completamente saturados. Con todo ello se logra apreciar que existe relación entre las estimaciones dadas por ambas tecnologías, siendo así, que al realizar un análisis de regresión lineal simple a la información recopilada con ambas tecnologías se determinó que el contenido de humedad estimado a través del balance hídrico se ajusta 92.8 % al contenido de humedad en el suelo estimado por la sonda FDR (figura 62).

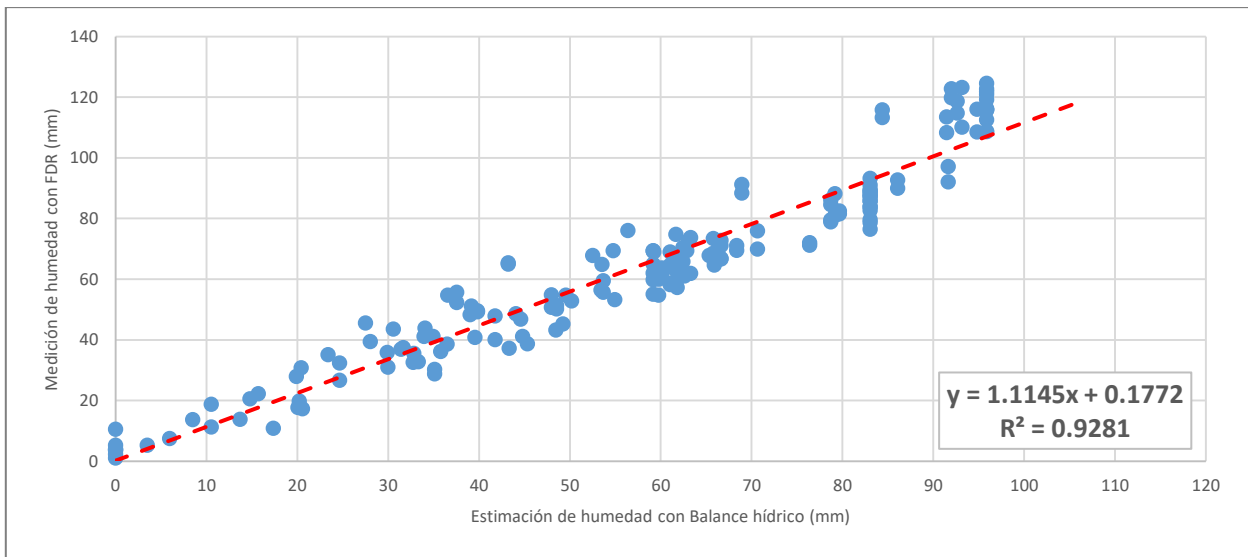


Figura 62. Diagrama de dispersión de datos del contenido de humedad estimado con balance hídrico vs FDR

El balance hídrico es una herramienta útil para predecir el contenido de agua en el suelo basado en las observaciones meteorológicas, conocimientos sobre las características físicas del suelo y la fenología del cultivo, presentando variaciones de 8 a 15 % respecto a la humedad reportada por sensores FDR en regiones donde no existe reporte de aporte capilar, en áreas donde este fenómeno se reporta, la variación aumenta hasta 25 %. A pesar de ello, los costos de implementar esta tecnología en todos los lotes del ingenio es relativamente bajo, ya que toda la franja cañera cuenta con estaciones meteorológicas tipo A y el ingenio posee una red de más de 180 pluviómetros en las 25,000 ha que administra,

lo que permite mejorar la precisión de esta tecnología al contabilizar las entradas de humedad por lluvia y salidas por evapotranspiración, sin embargo, es necesario centrar los esfuerzos de investigación en el establecimiento de metodologías que permitan conocer el aporte de humedad de la capa freática hacia el suelo, ya que actualmente, con la información con que se cuenta, no es posible estimar con precisión el aporte de agua capilar, lo que reduce la precisión del balance hídrico para predecir el contenido de humedad en el suelo bajo estas condiciones.

2.6.5 Variables biométricas

A. Agrícola del Sur

a. Población por metro lineal

La primera medición se realizó 81 D.D.S. determinando que en el testigo relativo la población media era de 16.8 plantas por metro y en el tratamiento con balance hídrico la población era de 17.81 plantas por metro (figura 63). Después de 196 días la población se redujo a 11.96 y 12.28 plantas por metro lineal en ambos tratamientos. Después de 286 D.D.S. la población se estabilizó en 11.65 y 12.69 por metro lineal.

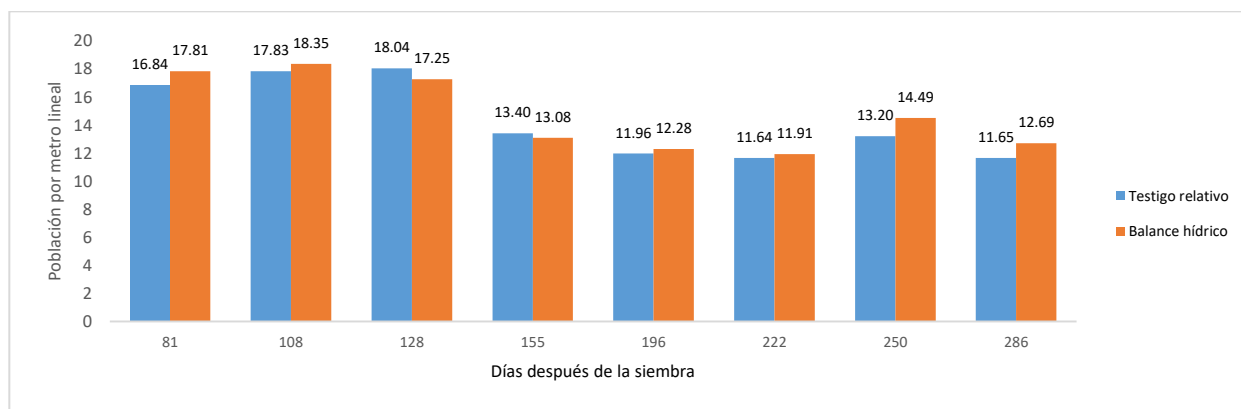


Figura 63. Población por metro lineal en el testigo relativo y el tratamiento con balance hídrico de finca Agrícola del Sur

b. Altura de planta

En la primera medición se determinó que el cultivo de caña presentó una altura media de 32.6 cm en el testigo relativo y 40.7 cm en el tratamiento con Balance hídrico (figura 64).

Después de 286 días la caña llegó a una altura media de 343.5 cm en el testigo relativo y 367.3 cm en el tratamiento con balance hídrico.

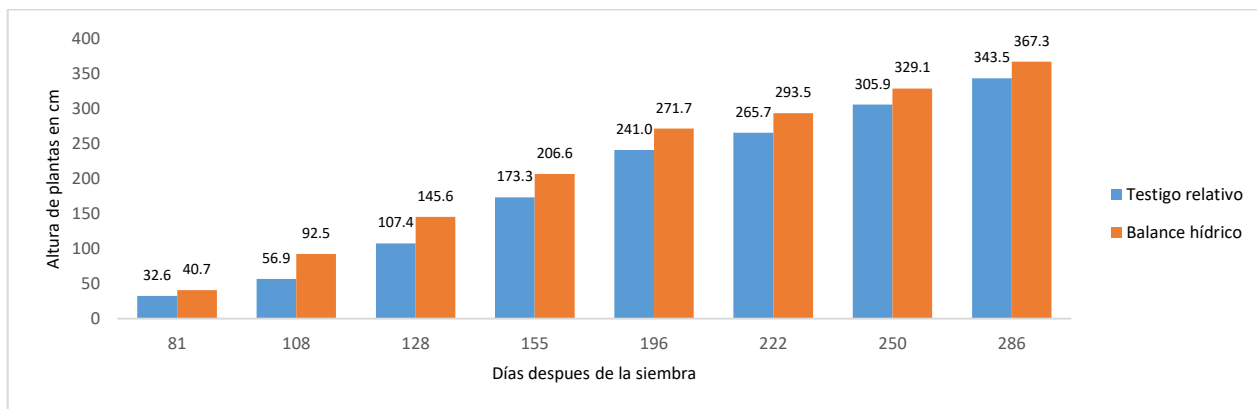


Figura 64. Altura de caña en el testigo relativo y tratamiento con balance hídrico de finca Agrícola del Sur

c. Longitud de entrenudos

Los entrenudos se distinguieron 128 días después de la siembra. En la primera medición el testigo relativo presentó una longitud media de 10.6 cm y 9.7 cm en el tratamiento con balance hídrico. Al comparar ambos tratamientos se determinó que la variación entre tratamientos no presentó ninguna tendencia, en las primeras tres mediciones la longitud de entrenudos del tratamiento con balance hídrico fue superior al testigo relativo, en las últimas dos mediciones la longitud de entrenudos en ambos tratamientos fue de 16.4 cm y 16.5 cm, concluyendo que esta variable no fue afectada por el manejo dado a cada tratamiento (figura 65).

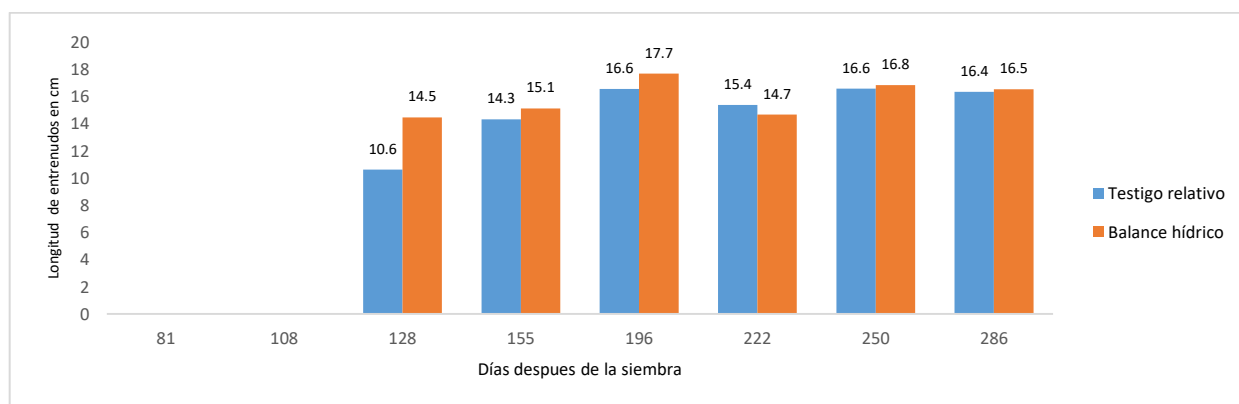


Figura 65. Longitud de entrenudos en el testigo relativo y tratamiento con balance hídrico de finca Agrícola del Sur

B. La Prosperidad

a. Población por metro lineal

Esta variable se inició a medir 87 D.D.S. reportando en el testigo relativo una población media de 17.61 cañas por metro y 19.19 en el tratamiento con balance hídrico, pudiendo observar que con el tiempo esta variable se estabilizó llegando a ser de 12 y 13.35 plantas por metro lineal en la última medición realizada 223 D.D.S. (figura 66).

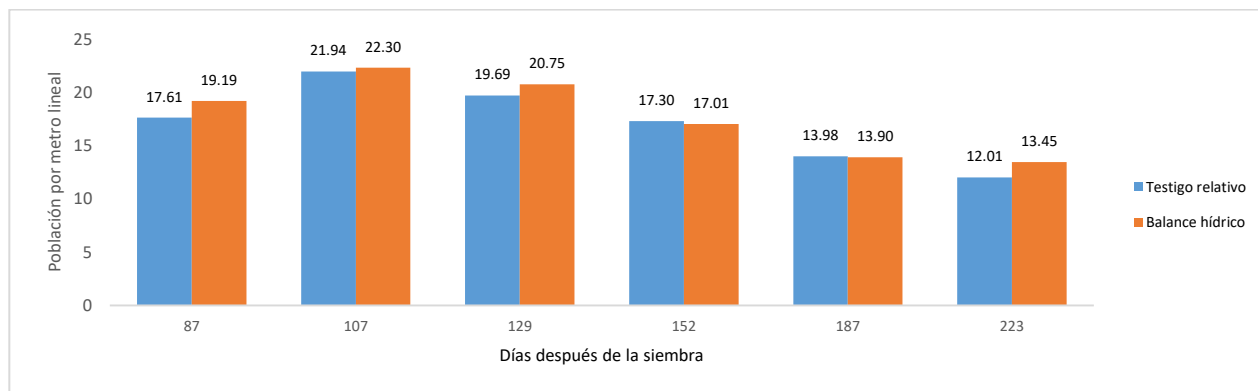


Figura 66. Población por metro lineal en testigo relativo y tratamiento con balance hídrico en finca La Prosperidad

b. Altura de planta

Desde la primera medición, realizada 87 D.D.S. se reportó un aumento en el tratamiento con balance hídrico, superando al testigo relativo por 6.7 cm, manteniéndose durante todo el ciclo del cultivo hasta la última medición realizada 263 D.D.S. con una variación 18.9 cm entre tratamientos, siendo superior la altura medida en los cultivos ubicados en el tratamiento con balance hídrico (figura 67).

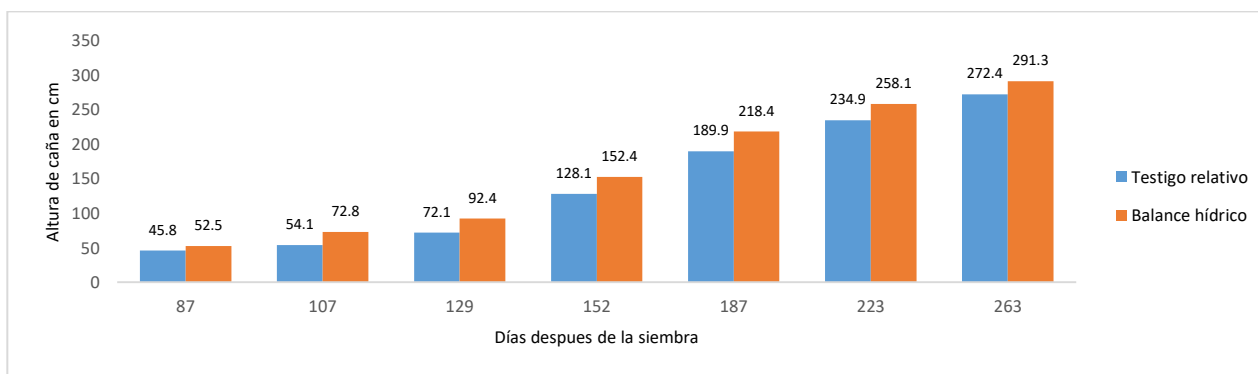


Figura 67. Dinámica de la altura en el tratamiento 1: testigo relativo y tratamiento 2: balance hídrico de la localidad dos

c. Longitud de entrenudos

Se empezaron a identificar entrenudos en los tratamientos 129 D.D.S (figura 68). Durante el desarrollo de la investigación, el comportamiento de esta variable fue similar en ambos tratamientos, pudiendo apreciar un aumento en la longitud pasado 263 días después de la siembra, teniendo ambos tratamientos una longitud media de entrenudos de 14.7 cm.

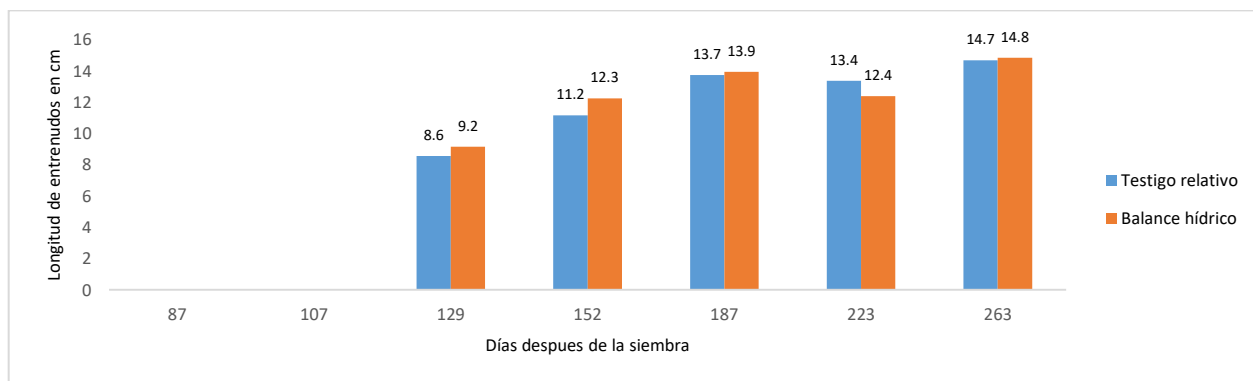


Figura 68. Longitud de entrenudos en el testigo relativo y tratamiento con balance hídrico dentro de finca La Prosperidad

C. California

La primera medición se realizó 82 D.D.S., concluyendo en la cuarta debido a vientos fuertes que abatieron al cultivo (figura 69), impidiendo la entrada a los puntos de muestreo, por lo que se analizó la información de los cuatro muestreos.



Figura 69. Abatimiento de caña por vientos en finca California

a. Población por metro lineal

La primera medición se realizó 82 D.D.S. determinando que la población en el testigo relativo era de 24.58 y en el tratamiento con balance hídrico de 20 plantas por metro lineal. En la última medición realizada 150 D.D.S. se observó que el testigo relativo presentaba una población de 15.38 similar a la reportada para el tratamiento con balance hídrico (figura 70). Sin embargo, por la etapa en la que se encontraba el cultivo no se considera aun estabilizado.

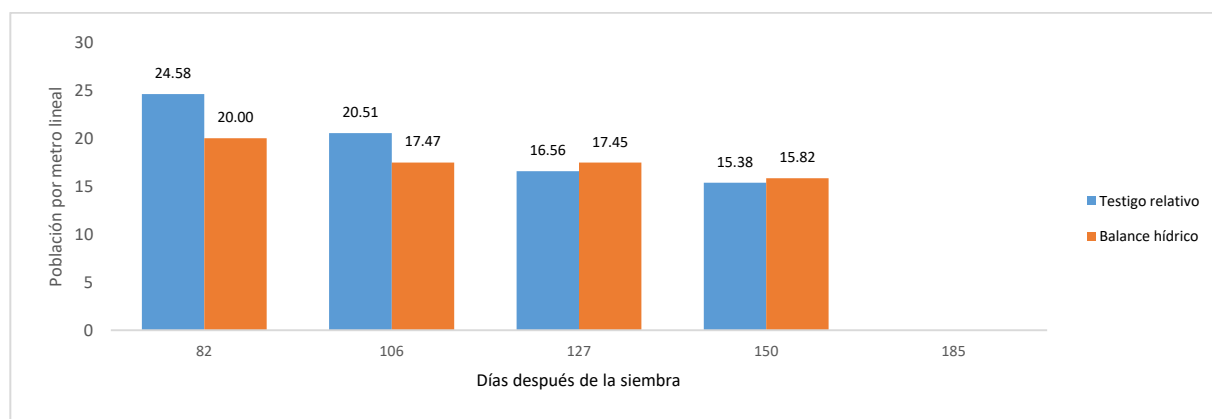


Figura 70. Población de caña por metro lineal en el testigo relativo y tratamiento con balance hídrico en finca California

b. Altura de planta

En las cuatro mediciones realizadas se observó la dominancia del testigo relativo sobre el tratamiento con balance hídrico (figura 71), separándolos por 20.5 cm en el último muestreo realizado.

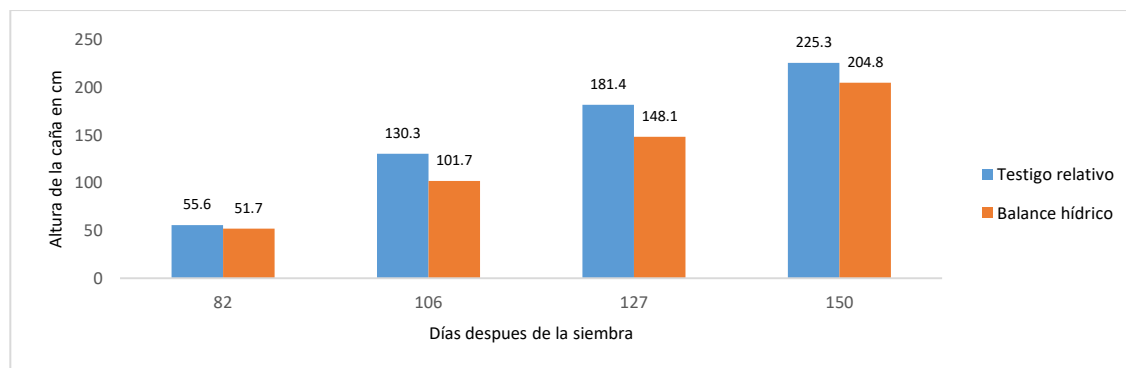


Figura 71. Altura de la caña en el testigo relativo y tratamiento con balance hídrico de finca California

Es necesario considerar que el cultivo se cosechó 342 D.D.S., por lo que los datos obtenidos hasta el día 152 no aportan información sobre la producción final de cada tratamiento.

c. Longitud de entrenudos

Los entrenudos se pudieron diferenciar en la medición realizada 120 D.D.S., por lo que durante los 68 días que duraron las mediciones se pudieron realizar dos mediciones de la longitud de entrenudos (figura 72). En ambas mediciones se observó la dominancia del testigo relativo sobre el tratamiento con balance hídrico.

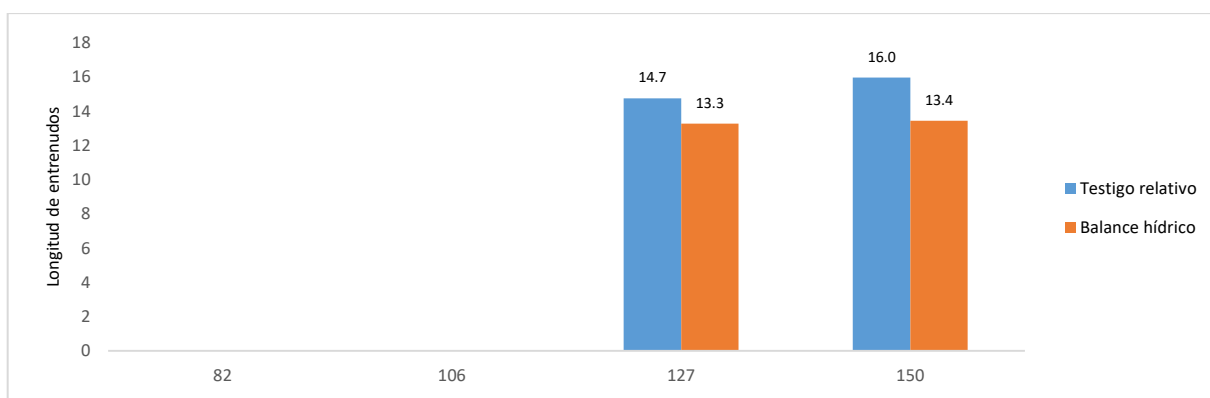


Figura 72. Longitud de entrenudos en el testigo relativo y tratamiento con balance hídrico de finca California

D. Efecto de las programaciones de riego sobre las características biométricas de la caña

De las variables biométricas medidas se observó que las variables población por metro lineal y altura de caña fueron afectadas significativamente por las aplicaciones de riego, tal como lo describe Juárez y Muñoz (1998), mencionando que existe correlación entre la altura de las plantas y el tonelaje final obtenido en la cosecha.

Durante el desarrollo de la investigación se pudo constatar que un aumento de altura se ve reflejado en un aumento de producción de caña, tal como lo ocurrido en la finca La Prosperidad, que 263 D.D.S. se realizó el último muestreo de altura, determinando que el tratamiento con balance hídrico superaba el testigo relativo por 19 cm, reflejándose en la producción final de 25.8 TCH sobre la producción obtenida en el testigo relativo, tal como explica Juárez y Muñoz (1998).

Basado en la información recopilada durante el desarrollo fenológico del cultivo se desarrolló para las primeras dos localidades la curva de desarrollo fisiológico.

Con la información de la variable respuesta altura se determinó la tasa de crecimiento en cada uno de los muestreos realizados (figura 73). En Agrícola del Sur la tasa de crecimiento que alcanzó la caña fue de 2.56 cm/día a 128 D.D.S., luego declina hasta 0.18 cm/día a 320 D.D.S. Perteneciendo al estrato medio, a una altitud media de 164 m s.n.m.

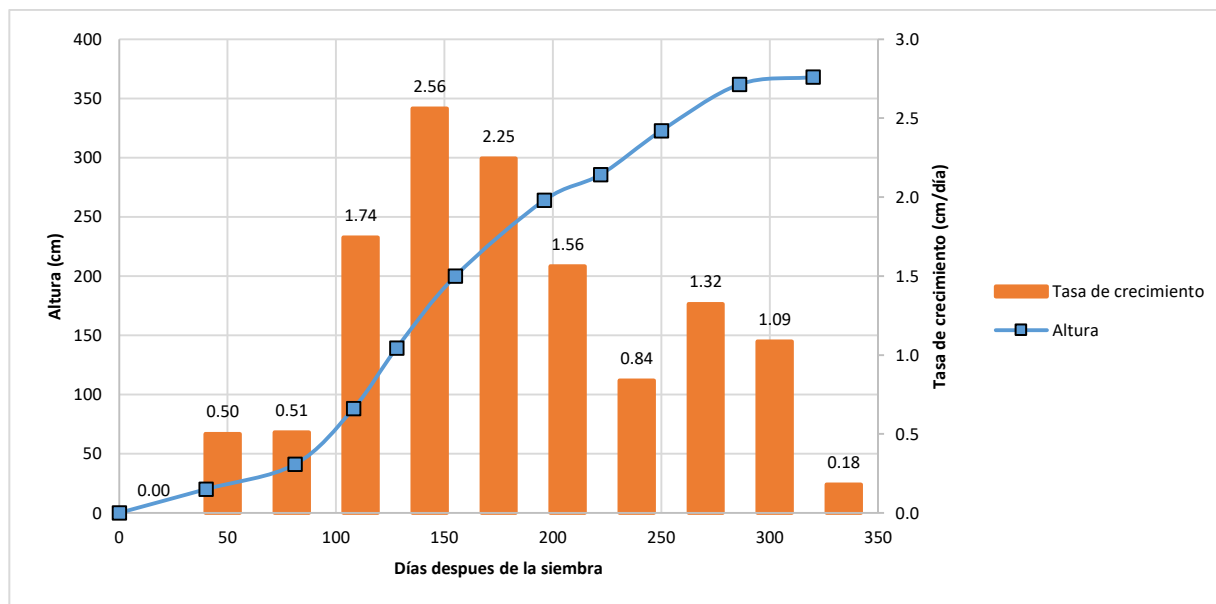
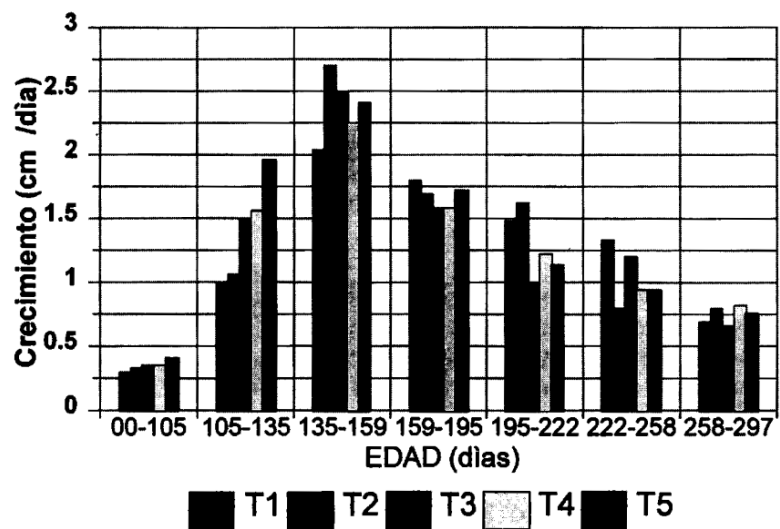


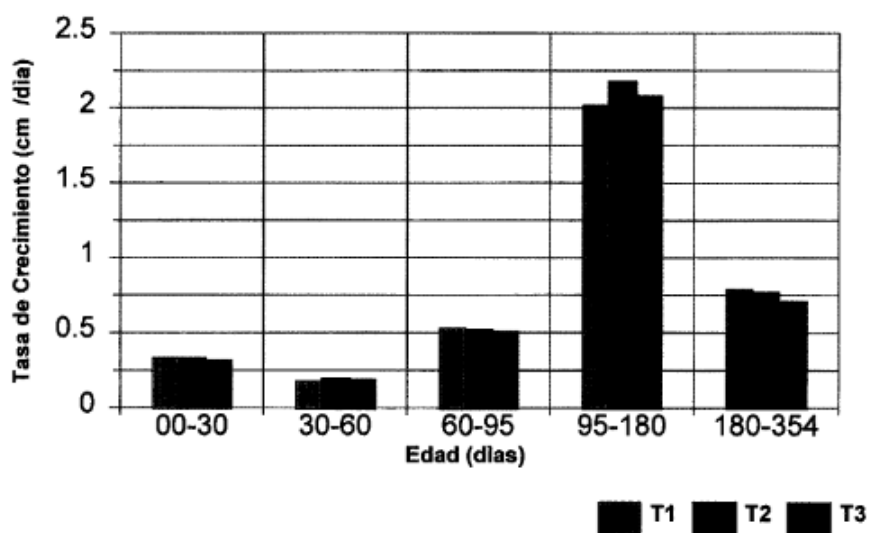
Figura 73. Altura y tasa de crecimiento de la caña en el tratamiento con balance hídrico de finca Agrícola del Sur

Resultados similares reporta Juárez y Muñoz (1998), para el Ingenio El Baúl ubicado en el estrato alto con un crecimiento lento en los primeros 105 días después del corte (figura 74). Al igual que en las condiciones de la finca El Jabalí, ubicado en el Ingenio Tierra Buena (figura 75).



Fuente: Juárez y Muñoz, 1998

Figura 74. Tasa de crecimiento de la caña en cm/día, Ingenio El Baúl, 1996



Fuente: Juárez y Muñoz, 1998

Figura 75. Tasa de crecimiento de la caña en cm/día, ensayo de tres láminas de riego en finca El Jabalí, Ingenio Tierra Buena, 1996

En finca La Prosperidad la máxima tasa de crecimiento registrada fue de 2.27 cm/día observada entre 129 a 152 D.D.S (figura 76). Anterior a ello, se observó que la tasa de crecimiento se mantuvo 0.45 y 0.54 cm/día.

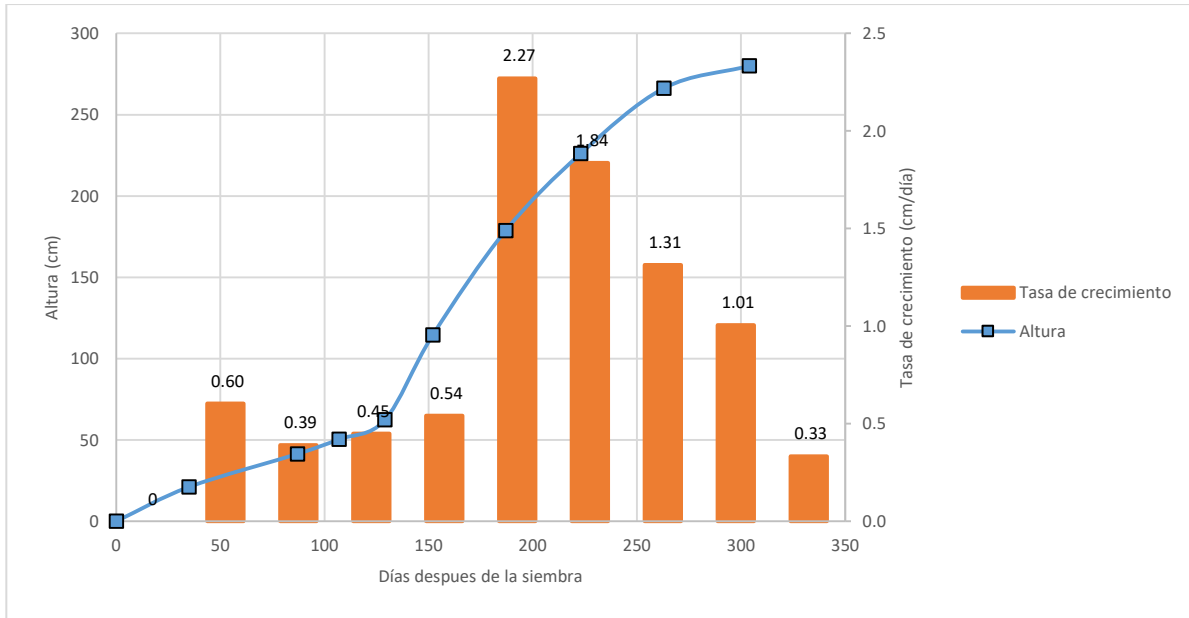


Figura 76. Altura y tasa de crecimiento de la caña en el tratamiento con balance hídrico de finca La Prosperidad

El comportamiento de la tasa de crecimiento observado en La Prosperidad es similar al reportado por Juárez y Muñoz (1998), en finca Playa Grande, del Ingenio Pantaleón, en caña de quinta soca, describiendo que los tratamientos con riego iniciaron la etapa de elongación en una edad aproximada de 117 días después del corte, cuando el testigo inició a los 141 días (figura 77); en cambio el tratamiento con balance hídrico inicia la fase de elongación 140 D.D.S., mantiene una tasa de crecimiento inferior a 0.5 cm/día hasta los 117 días, después aumenta drásticamente hasta 3 cm/día.

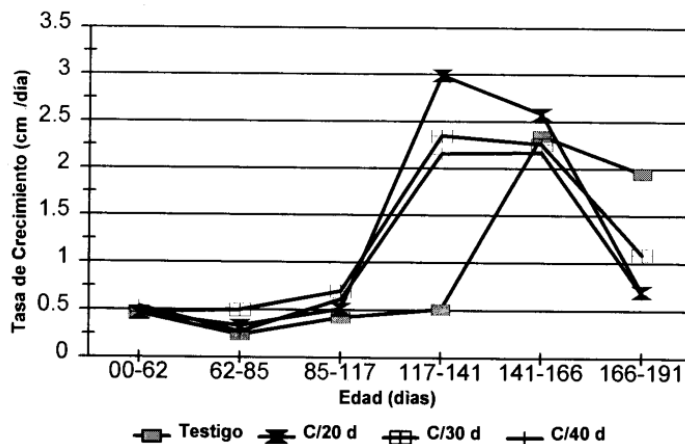


Figura 77. Tasa de crecimiento de la caña en cm/día, en finca Playa Grande, 1996

La información recopilada y validada con otros autores muestra como la fenología de la caña varía según las condiciones climáticas, la variedad, el número de corte y el estrato altitudinal a la que se encuentra el cultivo. Actualmente, en Guatemala, la única información que detalla la duración de las etapas fenológicas del cultivo en la franja cañera es de Juárez y Muñoz (1998) y Castro (2011), siendo estos específicos para algunas fincas estudiadas y el estrato Alto.

Basado en la duración de las etapas fenológicas se desarrolla el diseño agronómico de las fincas, con el cual se estima la lámina, frecuencia y tiempo a regar por cambio en cada lote. Para aprovechar eficientemente el recurso hídrico, humano y económico, además de proveerle al cultivo la cantidad de agua que requiere. Por ello se recomienda enfocar los esfuerzos de investigación en la caracterización de las etapas fenológicas en los distintos estratos de la franja cañera.

2.6.6 Producción de caña y azúcar

Para el análisis comparativo de los tratamientos se utilizaron las variables respuesta producción de caña por hectárea y producción de azúcar por hectárea, los resultados obtenidos en cada localidad se presentan a continuación en el cuadro 27.

Cuadro 27. Producción de caña y azúcar por hectárea en localidades evaluadas

Estrato Localidad Finca Tratamiento	Medio Localidad 1 Agrícola del Sur		Bajo Localidad 2 La Prosperidad		Litoral Localidad 3 California	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2
Fecha de siembra	24-dic-15		24-dic-15		27-dic-15	
Fecha de cosecha	20-nov-16		19-nov-16		3-dic-16	
Duración de ciclo (días)	332 (11.1 meses)		331 (11.0 meses)		342 (11.4 meses)	
Población por metro 280 D.D.S.	11.7	12.7	12.0	13.5	-	-
Altura 280 D.D.S. (m)	343.5	367.3	272.4	291.3	-	-
Longitud de entrenudos 280 D.D.S. (cm)	16.4	16.5	14.7	14.8	-	-
Producción de caña (Ton/ha)	129.78	133.21	97.49	123.36	151.36	167.14
Concentración de azúcar (Lb/Ton)	281.47	333.04	269.92	288.82	218.48	213.35
Producción de azúcar (Ton/ha)	18.26	22.17	12.98	17.81	16.54	17.80

Referencia:

*D.D.S: Días después de la siembra

A. Agrícola del Sur

El lote 521 de finca Agrícola del Sur se cosechó el 20 de noviembre de 2016 produciendo 129.78 Toneladas de caña por hectárea (TCH) en el testigo relativo y 133.21 TCH en el tratamiento con balance hídrico, la diferencia en la producción fue de 3.4 TCH. En el testigo relativo la concentración de azúcar fue de 281.47 libras por Tonelada de caña, produciendo 18.26 Toneladas de azúcar por hectárea (TAH), mientras que en el tratamiento con balance hídrico la concentración de azúcar reportada fue de 333 libras de azúcar por Tonelada, lo que sumó una producción de 22.17 TAH. La lámina de agua aplicada en ambos tratamientos varió por 8 mm en todo el ciclo del cultivo, en los siete riegos aplicados en cada tratamiento. Se observó que en esta localidad el manejo dado al testigo y el tratamiento con balance hídrico coincidieron por lo que la producción obtenida fue muy similar, las variaciones observadas en la producción de caña, que no superan los 3.5 TCH, se atribuyen a la variación del suelo dentro del lote, y no por el manejo dado al cultivo en cada tratamiento.

B. La Prosperidad

La finca La Prosperidad se cosechó el 29 de noviembre de 2016, 332 días después de la siembra, observando diferencia en la producción de caña obtenida en el testigo relativo, con 97.49 TCH, y el tratamiento con balance hídrico con una producción de 123.36 TCH, diferenciándose por 25.87 TCH. Teniendo en cuenta la concentración de azúcar, se estimó una producción de 12.98 TAH en el testigo relativo y 17.81 TAH en el tratamiento con balance hídrico, superando al primero por 4.83 TAH. El manejo del riego dado a cada tratamiento varió en esta localidad, el testigo relativo se le aplicaron 314.4 mm de agua, mientras que el tratamiento con balance hídrico recibió 497.82 mm de agua a través del riego, variando el número de riegos de 8 a 11, lo que influyó en la reducción de la frecuencia de riego bajando de 18 a 13 días. Por lo que el aumento en la producción de caña en el tratamiento con balance hídrico se atribuye a una mejor distribución del riego en el tiempo y el mantenimiento de la humedad en el suelo entre la CC y el DPM, permitiendo aumentar la producción a 123.26 TCH en un lote con suelos arenosos, observando un incremento en la producción de 8.6 TCH por cada riego adicional dado, en comparación al testigo relativo.

C. California

La tercera localidad ubicada en finca California se cosechó 342 D.D.S. Obteniendo en el testigo relativo una producción de 151.36 TCH, inferior al tratamiento con balance hídrico cuya producción fue de 167.14 TCH, observando el mismo comportamiento en la producción de azúcar, al superar el testigo relativo por 1.26 TAH.

En el transcurso de la investigación se determinó que la capa freática se encontraba a profundidades inferiores a un metro dentro del lote, influyendo en la dinámica del agua dentro del suelo; sin embargo, en el seguimiento dado con balance hídrico no se tomó en cuenta esta información por lo que la aplicación del riego se basó únicamente en las entradas de agua por riego y lluvia, y salidas de agua a través de la evapotranspiración. De esta forma se aplicó una lámina de 369 mm de agua al tratamiento con balance hídrico en comparación a los 250 mm aplicados en el testigo relativo, a pesar del aporte de agua por capilaridad se observó efecto en la producción de caña 167.14 TCH en el tratamiento con balance hídrico, superando al testigo relativo por 15.78 TCH, cuya producción fue de 151.36 TCH. De esta forma se observa que las variables respuestas producción de caña y azúcar muestran que la humedad aportada por capilaridad no fue suficiente para mantener al cultivo en óptimas condiciones para el desarrollo y crecimiento, obteniendo una mayor producción en el tratamiento con balance hídrico.

De estos resultados se concluye que a pesar de la humedad aportada por la capa freática es necesario tener en cuenta que mantener el suelo con humedad cercana al DPM no es suficiente para un óptimo desarrollo del cultivo, los tubos piezométricos son una herramienta sencilla y muy útil para conocer la profundidad de la capa freática en el lote, con los cuales se puede estimar indirectamente el aporte capilar de agua al suelo, aunque para ello es necesario realizar un monitoreo de la humedad del suelo a través de sondas FDR.

Actualmente el Ingenio Santa Ana no cuenta con puntos de monitoreo de la capa freática, por lo que se recomienda realizar un estudio y priorización de puntos para determinar la ubicación y distribución de tubos piezométricos para desarrollar una red de monitoreo de la capa freática la cual será útil para estimar indirectamente el aporte capilar de agua en pantes aledaños.

Es recomendable profundizar en el estudio de la relación entre la profundidad de la capa freática y el aporte capilar de agua al suelo aprovechable por el cultivo, en distintas texturas de suelo, ya que esta información proveerá mayor precisión al estimar indirectamente el aporte de agua por capilaridad sin necesidad de equipos como las sondas FDR.

Basado en los resultados observados en las tres localidades evaluadas se concluye que el balance hídrico es una tecnología económica y útil para la planificación del riego, permitiendo obtener incrementos en la producción de caña de 15 hasta 26 TCH, según las características del área; sin embargo, para su uso es necesario contar con información precisa de las propiedades físicas del suelo, el ciclo fenológico del cultivo y la cuantificación de las variables meteorológicas que influyen en la evapotranspiración del cultivo y metodologías que permitan conocer con exactitud el aporte de agua capilar en áreas donde la capa freática se encuentra cercana a la superficie del suelo.

Es recomendable enfocar los esfuerzos de investigación en la caracterización y duración de las etapas fenológicas del cultivo, en distintos estratos, números de corte y variedades de caña para poder adaptar la tecnología del balance hídrico a distintos estratos y variedades de caña con una mayor precisión, de esta forma proveer al cultivo las condiciones ideales para el desarrollo y generar una mayor producción de caña y azúcar, consecuentemente una mayor utilidad.

2.6.7 Análisis económico

Analizado el comportamiento de las variables respuesta en cada tratamiento en las tres localidades, fue necesario conocer la viabilidad financiera de cada uno de los tratamientos y la rentabilidad que pudieran tener (cuadro 28). En los incisos siguientes se analiza desde el punto de vista financiero la superioridad de un tratamiento sobre otro utilizando la metodología de utilidades parciales.

Cuadro 28. Resultado de análisis económico a través de la metodología de utilidades parciales

Estrato Localidad Finca	Medio Localidad 1 Agrícola del Sur		Bajo Localidad 2 La Prosperidad		Litoral Localidad 3 California	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2
Extensión de tratamiento (ha)	2.11	1.53	3.17	2.73	1.63	1.92
Número de riegos aplicados	7	7	8	11	5	8
Horas de labores ejecutadas	30.10	38.50	70.70	83.70	44.40	72.00
Costo de evento riego por hectárea (US\$)	32.00	56.33	43.66	43.68	82.23	73.35
Costo total de riego por hectárea (US\$)	224.00	394.32	349.30	480.50	426.16	586.82
Producción de caña (TCH)	129.78	133.21	97.49	123.36	151.36	167.14
Diferencia entre tratamientos (TCH)	-	3.43	-	25.87	-	15.78
Producción de azúcar (TAH)	13.56	17.35	9.63	13.35	12.90	13.81
Diferencia entre tratamientos (TAH)	-	3.79	-	3.72	-	0.91
Producción de azúcar (qq/ha)	271.20	347.07	192.64	267.07	257.96	276.28
Ingreso por venta de azúcar (US\$/ha)	4,610.42	5,900.11	3,274.88	4,540.26	4,385.37	4,696.80
Utilidad parcial por hectárea (US\$)	4,386.42	5,505.79	2,925.58	4,059.76	3,959.21	4,109.98
Diferencia entre tratamientos (US\$)	-	1,119.37	-	1,134.18	-	150.77

Referencia:

*Se consideró un precio por quintal de azúcar vendida de US\$ 17.00

A. Agrícola del Sur

Durante los 332 días que duró el ciclo productivo de la plantación, se realizaron 7 riegos, invirtiendo en el testigo relativo 30.1 horas de labor de riego para 2.11 ha, generando un costo de US\$ 223.99/ha por los 7 riegos aplicados, equivalente a US\$ 32.00 por evento de riego en una ha. El tratamiento con balance hídrico requirió 38.6 horas para llevar a cabo los 7 eventos de riego, en una extensión de 1.53 ha, generando un gasto de US\$ 394.32, siendo equivalente a un costo por riego de US\$ 56.33 por ha, pudiendo observar que el tratamiento con balance hídrico generó mayor inversión que el testigo relativo, por la utilización de un marco de riego más corto permitiendo que se regara menos área por hora.

Para determinar la utilidad parcial generada por tratamiento fue necesario considerar la pérdida industrial generada al transformar la caña en azúcar, esta pérdida fue de 72.5 libras de azúcar por tonelada de caña en el lote. Considerando un precio de US\$ 17.00 por quintal de azúcar, el ingreso obtenido en el testigo relativo fue de US\$ 4,610.42; al sustraer los egresos generados por el riego, de US\$ 223.99, se obtuvo la utilidad parcial de US\$ 4,386.43/ha; en el tratamiento con balance hídrico el ingreso obtenido de la venta de azúcar

fue de US\$ 5,900.11/ha, generando una utilidad parcial de US\$ 5,505.79, siendo superior al testigo relativo por US\$ 1,119.36.

A pesar de la existencia de una utilidad parcial que beneficia el tratamiento con balance hídrico, no se puede asegurar que se deba específicamente al manejo del riego dentro del tratamiento, como se ha podido observar el manejo dado a ambos tratamientos fue similar, tanto en lámina, frecuencia y número de riegos aplicados, incluso en la distribución por etapa fenológico. La producción de caña obtenida fue similar en ambos tratamientos, siendo variante la concentración del azúcar en los tratamientos, influyendo en la utilidad parcial obtenida, beneficiando al tratamiento con balance hídrico. Bajo estos argumentos se concluye que en la finca Agrícola del Sur no se observó diferencia entre la aplicación del balance hídrico para la planificación del riego y el manejo actual, ya que ambos tratamientos aportaron al cultivo la humedad requerida basado en la meteorología del lugar.

Es de tener en cuenta que basar las decisiones de riego en un balance hídrico no significa una reducción en el número de riegos a aplicar por ciclo, ni la reducción de la lámina de agua a utilizar; el balance hídrico ayuda al usuario a distribuir y aplicar el riego en el momento y la cantidad que requiere la plantación.

B. La Prosperidad

Para el testigo relativo el costo total del riego fue US\$ 349.30 por ha, por los ocho riegos aplicados al tratamiento durante todo el ciclo, inferior a lo invertido en el tratamiento con balance hídrico, cuyo costo por hectárea aumento a US\$ 480.50 por los 11 riegos aplicados. Sin embargo, el ingreso obtenido en el testigo relativo fue de US\$ 3,274.88, generando una utilidad parcial de US\$ 2,925.58/ha, superado por los US\$ 4,059.77/ha generados por el tratamiento con balance hídrico.

Al eliminar el agua como limitante de producción se observó que la producción de caña pasa de 97.49 a 123.36 TCH, aumentando la producción 25.87 TCH, al basar la decisión de riego en un balance hídrico, pudiendo generar una utilidad parcial de US\$ 1,134.18 sobre la utilidad obtenida con el testigo relativo, aunque es necesario tener en cuenta que la implementación del balance hídrico en esta localidad aumentó el costo total del riego a US\$ 480.50, lo que se traduce en una mayor inversión en riego, por lo se recomienda tener en cuenta al implementar esta herramienta en nuevas fincas que existirá un aumento en el

costo de la labor de riego, aunque estos costos se recuperarían al final de la producción y se lograría generar una utilidad parcial extra sobre lo que se obtendría en el testigo relativo.

C. California

El testigo relativo se estableció en una extensión de 1.63 ha, invirtiéndose US\$ 426.16 por ha por los 5 riegos aplicados en todo el ciclo de la plantación, inferior a la inversión realizada en el tratamiento con balance hídrico, de US\$ 586.82 por los 8 riegos aplicados durante el ciclo. Se obtuvo una producción de 12.9 TAH en el testigo relativo inferior al tratamiento con balance hídrico cuya producción fue de 13.81 TAH. El ingreso obtenido en el testigo relativo fue de US\$ 4,385.37 generando una utilidad parcial de US\$ 3,959.21; en cambio, el tratamiento con balance hídrico generó una utilidad parcial de US\$ 4,109.98, superior en US\$ 150.77 al primer tratamiento.

La diferencia encontrada entre esta localidad y las dos primeras fue el registro de aporte capilar de agua a través de la capa freática, comprobable con las mediciones del nivel freático realizadas con los tubos piezométricos y las mediciones de la humedad del suelo realizadas con las sondas tipo FDR. Dentro del balance hídrico no se consideró este aporte de agua por lo que durante el ciclo se aplicaron 8 riego, manteniendo la humedad del suelo entre la capacidad de campo, pudiendo obtener una producción de 15.78 TCH sobre la obtenida con el testigo relativo, lo que muestra que este aporte de agua no fue suficiente para propiciar las condiciones de humedad en el suelo para que el cultivo pudiera expresar su potencial genético reflejándose en una producción inferior a la obtenida con el balance hídrico.

La herramienta del balance hídrico es fundamental para la programación del riego en lotes de la franja cañera guatemalteca siempre que se alimente de información detallada de las características del suelo, la fenología del cultivo, la meteorología y el nivel freático en cada pante.

2.7 CONCLUSIONES

1. En La Prosperidad a ambos tratamientos fueron aplicados 125 mm de agua en la etapa de iniciación o establecimiento (2 riegos), equivalente a una relación entre la lámina aplicada sobre la lámina requerida de 1.1 ($K=1.1$), lo que significa que durante esta etapa se aplicó mucha más agua que la requerida. En la etapa de macollamiento del balance hídrico se aplicaron 199 mm de agua (4 riegos), lo que significa haber manejado un K de 0.6, indicando que se aplicó un poco más de agua que la requerida; el testigo comercial fue manejado con un K de 0.4, infiriéndose que este tratamiento recibió la cantidad de agua requerida durante esta etapa. En la etapa de elongación el balance hídrico recibió 173 mm de agua (5 riegos), con un K de 0.8, significando que la cantidad de agua recibida por este tratamiento fue un poco inferior a su demanda; el testigo desarrolló un K de 0.4, lo que significa que este tratamiento fue provisto de una cantidad mínima de agua, mucho inferior que su demanda de agua en esta etapa.
2. En La Prosperidad se observó un incremento en la producción de 25.80 TCH, al basar la decisión del riego en un balance hídrico. La demanda de agua total durante la época seca (diciembre-mayo) según el balance hídrico fue de 497 mm de agua (11 riegos), que equivalió a la lámina de agua aplicada a este tratamiento, mientras que al testigo comercial se aplicaron 314 mm de agua (8 riegos). Se infiere que el incremento de producción (25.8 TCH) del balance hídrico se debió por satisfacer muy cercanamente la demanda de agua durante la etapa de elongación ($K=0.8$).
3. En California se aplicaron 94 mm de agua (2 riegos) en la etapa de iniciación a ambos tratamientos, obteniendo un K de 0.8, indicando que durante esta etapa se aplicó mucha más agua que la requerida. En la etapa de macollamiento del balance hídrico se aplicaron 142 mm de agua (3 riegos), resultando con un K de 0.5, lo que significa que este tratamiento recibió un poco más de agua que la requerida; el testigo comercial fue manejado con un K de 0.4, lo que significa que recibió la cantidad de

agua que requería. En la etapa de elongación el balance hídrico recibió 133 mm de agua (3 riegos), con un K de 0.9, significando que la cantidad de agua recibida por este tratamiento fue muy cercana a la requerida; el testigo se regó con un K_c de 0.5, recibiendo una lámina de agua menor a la requerida.

4. En California se observó un incremento en la producción de 15.78 TCH al basar la decisión de riego en un balance hídrico, demandando durante la época seca 369 mm de agua, la misma lámina aplicada en este tratamiento a través de 8 riegos; en cambio, en el testigo se aplicaron 250 mm de agua (5 riegos). Se concluye que el incremento de producción (15.78 TCH) del balance hídrico se debió al manejo del riego en la etapa de elongación, al satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo con un K de 0.9.
5. En Agrícola del Sur la lámina aplicada a ambos tratamientos fue de 122 mm (2 riegos) en la etapa de iniciación, equivalente a un K de 1.2, mucho mayor a lo requerido durante esta etapa. En la etapa de Macollamiento del balance hídrico se aplicaron 175 mm de agua (3 riegos), manejando un K de 0.7; al testigo se le aplicó una lámina de agua similar obteniendo el mismo valor de K, lo que significa que durante esta etapa se aplicó más agua que la requerida en ambos tratamientos. En la etapa de elongación la lámina aplicada al balance hídrico fue de 77 mm (2 riegos), manejando un K de 1, indicando que a este tratamiento se le aplicó la cantidad de agua que requería; el testigo se regó con un K de 1.1, lo que indica que durante esta etapa se le aplicó más agua que la que requería.
6. En Agrícola del Sur la producción obtenida en ambos tratamientos fue similar, 129.78 TCH en el testigo y 133.21 TCH en el balance hídrico. En el balance hídrico se aplicaron 374 mm de agua (7 riegos) y en el testigo se aplicaron 382 mm (7 riegos), abasteciendo la demanda de agua, infiriendo que bajo las condiciones en las que se encuentra la finca, el manejo del riego basado en el balance hídrico coincidió con el manejo del riego en el testigo.

7. Se observa que las respuestas a riegos obtenidas en los dos sitios se debieron fundamentalmente a la satisfacción de la demanda de agua durante la etapa de elongación, ya que, en ambos lugares, ambos tratamientos durante las etapas de iniciación y macollamiento, fueron regados con las mismas laminas; lo que demuestra el impacto considerable de satisfacer la demanda de agua durante la etapa de elongación.
8. Con la implementación del balance hídrico se observó un aumento en el costo total del riego, llegando a US\$ 586.82/ha en la finca California. Sin embargo, la utilidad parcial o la ganancia después de satisfacer el costo neto del riego superó en US\$ 150.77/ha a la obtenida con el testigo. En La Prosperidad la utilidad parcial o ganancia obtenida en el tratamiento de balance hídrico superó al testigo por US\$ 1,134.18/ha. En fincas como Agrícola del Sur la producción de caña fue similar en ambos tratamientos, por coincidir el manejo del riego.
9. Existe una relación directa entre la lámina de riego aplicada y las variables de desarrollo población y altura de caña, siendo indicadoras del tonelaje de caña a obtener en la cosecha. En Agrícola del Sur se registró una máxima tasa de crecimiento de 2.56 cm/día, entre 108 a 128 D.D.S. En La Prosperidad la tasa de crecimiento más alta observada fue de 2.27 cm/día, entre 129 a 152 D.D.S, representando los estratos medio y bajo de la franja cañera.
10. La variación entre la estimación de humedad realizada con el balance hídrico y la sonda FDR fue inferior a 3.35 mm, representando una variación 14 %, en áreas sin registro de aporte capilar. En áreas con aporte capilar, como finca California, la variación aumenta hasta 25 %, tendiendo a subestimar el contenido de humedad en el suelo, ajustándose 92.8 % a las mediciones realizadas con una sonda FDR.

2.8 RECOMENDACIONES

1. Los resultados expuestos sobre la rentabilidad del tratamiento con balance hídrico son específicos para La Prosperidad y California, por lo que se recomienda realizar ensayos similares bajo condiciones distintas de textura de suelo, estrato altitudinal, tercio de zafra, número de soca y sistema de riego para poder generalizar las conclusiones dadas.
2. La variación entre las mediciones biométricas realizadas en las tres localidades muestra la necesidad de seguir evaluando el desarrollo fenológico de la caña en distintos estratos altitudinales, tercio de zafra, número corte y variedades de mayor uso comercial. Se recomienda enfocar los esfuerzos de investigación en la caracterización de las etapas fenológicas, importante para la planificación del riego.
3. El balance hídrico es una herramienta útil para la planificación del riego en estratos donde la capa freática no tiene influencia sobre la humedad del suelo. En áreas con aporte de agua por capilaridad es necesario desarrollar proyectos orientados al monitoreo de la capa freática y el desarrollo de metodologías para estimar el aporte de agua capilar a la zona radicular, mejorando la precisión del balance hídrico en estas condiciones.
4. Se recomienda a nivel experimental y comercial seguir evaluando el impacto del riego en las distintas etapas fenológicas del cultivo y corroborar la respuesta al riego en la etapa de elongación.
5. Se recomienda el uso del balance hídrico para la programación del riego ya que es una herramienta útil y económica para estimar la humedad en el suelo, manteniendo una actualización diaria del contenido de humedad y permitiendo establecer las frecuencias de riego según las necesidades del cultivo y las condiciones

meteorológicas del área. Sin embargo, es necesario seguir investigando sobre la precisión de esta herramienta en áreas con y sin registro de aporte capilar.

2.9 BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R., Pereira, L., Raes D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Roma: FAO. (Serie Riego y Drenaje, Documento FAO 56).
- Almorox, J. (2017). *Métodos de estimación de las evapotranspiraciones ETP y ETr*. Obtenido de CRIUAEMéx: <http://idrisi.uaemex.mx/files/29/Sesion-7---Interpolacion/61/metodosevapotranspiraciones.pdf>
- Alonso, M., & Finn, E. (1971). *Fundamentos cuánticos y estadísticos*. México: Fondo Educativo Interamericano.
- Angelone, S., Garibay, M. T., & Cauhapé, M. (2006). *Geología y geotecnia permeabilidad de suelos*. Argentina: Universidad Nacional de Rosario.
- Armaya Estévez, A., Cock, J., & Pilar Hernández, A. (1995). *Biología de la caña*. En C. Cassalet, J. S. Torres, & C. H. Isaacs, *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia*. (p. 31-62). Colombia: CENICAÑA.
- Banco de Guatemala (BANGUAT). (2016). *Estadísticas macroeconómicas*. Recuperado el 1 de abril de 2016, de BANGUAT: <http://www.banguat.gob.gt/inc/main.asp?id=111348&aud=1&lang=1>
- Benítez, A. (1972). *Captación de aguas subterráneas: Nuevos métodos de prospección y de cálculo de caudales*. Madrid: Dossat.
- Berengena, J. (2015). *Validación de un equipo FDR para estimar la extracción de agua por los cultivos*. Córdoba: C.I.F.A., Departamento de Suelos y Riegos.
- Berengena, J., Puech, I., & Gavilán, P. (2007). *Validación de un equipo FDR para estimar la extracción de agua por los cultivos*. Córdoba: C.I.F.A., Departamento de Suelos y Riegos.
- Cassalett, C., Torres, J. S., & Isaacs, C. H. (1995). *El cultivo de la caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia*. Valle de Cauca: CENICAÑA.

- Castillo, F., Castellví, Á., Bosch, J., Cusidó, J., & Sánchez, E. (2001). *Agrometeorología*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Castro, O. R. (2005). *El balance hídrico (herramienta para la planificación del riego en caña de azúcar)*. Guatemala: CENGICAÑA.
- _____. (2011). *El riego en el cultivo de la caña de azúcar*. En CENGICAÑA, *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala* (p. 1-25). Guatemala: Artemis Edinter.
- _____. (2014). *Programación del riego según la relación: Agua-suelo-caña-clima*. Escuintla, Guatemala: CENGICAÑA.
- Castro, O., & Monterroso, H. (2012). *Procesos para la planificación del uso de la tecnología del riego en las condiciones de la zona cañera de Guatemala*. Escuintla, Guatemala: CENGICAÑA.
- _____. (2017). *La dinámica del riego a través del uso de herramienta web especializada (Cengirriegos v.2.0)*. Guatemala: CENGICAÑA.
- Castro, O., Osorio, R., Esquit, V., López, H., & López, F. (2006). *Recomendaciones técnicas y económicas para la aplicación del riego en la caña de azúcar En: Memoria de presentación de resultados de investigación de zafra 2005-2006*. Escuintla, Guatemala: CENGICAÑA.
- Castro, O. R., Pinzón, J. F., & Montufar, J. (2016). *Evaluación técnica y económica del riego por aspersión tipo cañón*. Guatemala: CENGICAÑA.
- Castro, O., Pocasangre, R., & Monterroso, H. (2012). *El uso del FDR para la estimación de la humedad en el suelo. La importancia de la calibración en nuestras condiciones*. Santa Lucía Cotzumalguapa, Guatemala: CENGICAÑA.
- Castro, O., & Rosales, C. (2007). *Recomendaciones técnicas y económicas para la aplicación del riego en ambientes con aporte capilar en la zona cañera guatemalteca*. Santa Lucía Cotzumalguapa, Guatemala: CENGICAÑA.

- Castro, O. R., Tuchan, L., & Tuyún, E. (2012). *La uniformidad de distribución del agua en las opciones tecnológicas de tres y seis horas de riego en el sistema de aspersion de presión media, de "miniaspersion"*. Guatemala: CENGICAÑA.
- Centro Guatemalteco de Investigación de la Caña de Azúcar, Guatemala (CENGICAÑA). (2017). *Informe anual de zafra 2015-2016*. Guatemala. Obtenido de <https://cengicana.org/files/20170307090331137.pdf>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana.
- Cruz, V., Torres, J., Besosa, T., & Rojas, L. (2010). *Tecnologías de riego para el uso eficiente y sostenible del agua en el sector cañicultor*. En: Cali, Colombia: CENICAÑA, Carta Trimestral.
- Diestre, A. (2017). *Sondas de capacitancia FDR para monitoreo de humedad de suelo*. Obtenido de Red Agrícola: <http://www.redagricola.com/reportajes/riego/sondas-de-capacitancia-fdr-para-monitoreo-de-humedad-de-suelo>
- Doorenbos, J., & Kassan, A. (1979). *Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos*, no. 33. Roma, Italia: FAO, (Estudio Riego y Drenaje).
- Edgerton, C. (1958). *Sugar cane and its diseases*. Baton Rouge, Estados Unidos: Louisiana State University Press.
- Ellis, R. D., & Lankford, B. A. (1990). *The tolerance of sugarcane to water stress during its main development phases*. En *Agricultura I water management*. The Netherlands: Elsevier Science.
- FAO. (2017). *Sugarcane, water relations and water managment of sugarcane*. Obtenido de FAO; <http://www.fao.org/landandwater/aglw/cropwater/sugarcane.stm>
- García, I., Jiménez, J., Muriel, L., Perea, F., & Vanderlinden, K. (2005). *Evaluación de sondas de capacitancia para el seguimiento de la humedad de un suelo arcilloso bajo distintas condiciones y tipos de manejo*. Sevilla, España: Junta de Andalucía.

- Gonçalves, R. R. (2008). *Relação entre a resposta espectral da cana-de-açúcar, registrada nas imagens dos satélites AVHRR/NOAA, em São Paulo, e dados agroclimáticos, no período de 2001 a 2008*. São Paulo, Brasil, Universidad Estatal de Campinas, Facultad de Ingeniería Agrícola.
- Guarnizo, E. (2007). *Manejo de aguas*. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Desarrollo Rural (Incoder).
- Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. California, Estados Unidos: Elsevier Academic Press.
- Holden, J., & Rozeff, N. (1998). *Irrigation of sugarcane*. Australia: Indooroopilly, Queensland, Australia: Bureau of Sugar Experiment Stations.
- Illescas Ovalle, R. E. (2014). *Cuantificación del aporte de agua capilar para la programación del riego en el cultivo de la caña de azúcar, en la cuenca del río Acomé*. (Tesis Ing. Agr.). Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas: Escuintla, Guatemala.
- Inet. (2017). *La velocidad del viento*. Obtenido de Olimpiadas Nacionales de Contenidos Educativos en Internet:
http://www.oni.escuelas.edu.ar/2004/san_juan/676/eolica_y_molinos/capitulo_1/cap_1_2.htm
- Isaccs, C., Carrillo, V. E., Caicedo, G., Paz, H. G., & Palma, A. E. (1998). *Los clientes de la nueva tecnología. Censo y tipificación de productores de caña de azúcar de la industria azucarera colombiana*. CENICAÑA, Serie Técnica no. 27. Obtenido de http://www.cenicana.org/publicaciones/serie_tecnica/serie_tecnica.php?opcion=14&menu=2
- Jiménez, C. A., Vargas, T. W., Salinas, C., Aguirre, B. M., & Rodríguez, C. (2004). *Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas*. México: Instituto de Geografía.
- Jobgágy, E., & Nosetto, M. (2009). *Napas freáticas: pautas para comprender y manejar su impacto en la producción*. San Luis, México: Grupo de Estudios Ambientales -

IMASL-CONICET & Universidad Nacional de San Luis, Departamento de Agronomía.

Juárez, A. (2017). *Radiación solar*. Obtenido de Argentina: Instituto Nacional de Educación Tecnológica:

<http://www.oni.escuelas.edu.ar/2008/cordoba/1324/trabajo/radiacionsolar.html>

Juárez, D., & Muñoz, E. (1998). *Requerimientos de riego de la caña de azúcar en la Costa Sur de Guatemala. Estudio exploratorio*. Guatemala: CENGICAÑA.

Laserna, S. (2017). *Pérdidas de agua en el suelo: escorrentía, filtración profunda y evaporación*. Obtenido de AgroEs: <http://www.agroes.es/agricultura/agua-riegos-regadios/318-perdidas-de-agua-en-el-suelo-agricultura>

Madrigales Barrios, N. R. (2013). *Evaluación de tres métodos de riego por superficie durante la etapa de elongación de la caña de azúcar (Saccharum spp.), bajo condiciones de Tiquisate, Escuintla*. (Tesis Ing. Agr.). Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía: Guatemala.

Manilla, A., Valdez, J., Gamica, P., & Martínez, G. (2017). *La permeabilidad de los suelos en los problemas de transporte de contaminantes. Aplicación en la infraestructura de transporte*. Obtenido de Instituto Mexicano del Transporte:

<http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt195.pdf>

Montero, J. (2000). *Análisis de la distribución de agua en sistemas de riego por aspersión estacionario*. La Mancha, España: Universidad de Castilla.

Muñoz, F. (2009). *Importancia del agua en la nutrición de los cultivos*. Valle de Cauca, Colombia: CENICAÑA.

NETAFIM. (2017). *Manejo del riego*. Obtenido de: Netafim, de:

http://www.sugarcane crops.com/s/agronomic_practices/irrigation_water_management/#top

Orozco, E. (2009). *Relación precipitación-escorrentía*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria.

- Pardo, J. V., & Proaño, J. S. (2008). *Programación del riego mediante el balance hídrico en una plantación de caña de azúcar (Saccharum officinarum) en el cantón Marcelino Maridueña provincia del Guayas*. Quito, Ecuador: Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Obtenido de <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/9.-Ing.-Jose-Pardo.-Riego.pdf>
- Peña, M. (1997). *Programación in vitro de la caña de azúcar*. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano.
- Pérez, A. (1992). *Cálculo de la necesidad de agua de las plantas con datos meteorológicos*. Riobamba, Ecuador: Riobamba Pedagógica Friere.
- Pierre Gourou, L. P. (1970). *Compendio de geografía general*. España: Rialp.
- Pizzetti, C. (1991). *Acondicionamiento del aire y refrigeración*. España: BDS Librería Editorial.
- PortalFruticola. (2017). *¿Qué es el coeficiente de cultivo? Aplicaciones en riego*. Obtenido de PortalFruticola.com: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2016/08/14/que-es-le-coeficiente-de-cultivo-kc-aplicaciones-en-riego-valores-por-especie/>
- Quezada, C., Maldonado, I., Márquez, L., & Aravena, R. (2013). *Comportamiento de la sonda de capacitancia en el monitoreo del contenido de agua del suelo*. Chile: Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo.
- Ramme, P. F. (2008). *Perfis temporais NDVI e sua relagáo com diferentes tipos de ciclos vegetativos da cultura da cana-de-açúcar*. (Tesis PhD.). Universidad Estatal de Campinas, Facultad de Ingeniería Agrícola: São Paulo, Brasil.
- Reyes, M. (2001). *Análisis económico de experimentos agrícolas con presupuestos parciales*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, Centro de Información Socioeconómica (CIAGROS).
- Ruiz, A. (2010). *Automatización y telecontrol de sistemas de riego*. Murcia, España: Marcombo Ediciones Técnicas.

- Sandoval, J. (2007). *Principios de riego y drenaje*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Editorial Universitaria.
- Sentek. (2003). *Manual de uso Diviner 2000*. Australia: Sentek.
- _____. (2011). *Manual de calibración para la medición de humedad en suelos con el Diviner 2000*. Australia: Sentek.
- Sokolov, A. A., & Chapman, T. G. (1981). *Methods for water balance computation*. Paris: UNESCO. (Serie Studies and Reports in Hydrology, no. 17).
- Tarjuelo, J. (1995). *El riego por aspersión y su tecnología*. España: Mundi-Prensa.
- Torres, J. (1995). *Riego en el cultivo de la caña de la zona azucarera de Colombia*. Cali, Colombia: CENICAÑA.
- _____. (2016). *La importancia que tiene la capa freática en los cultivos*. Obtenido de La Nación: <http://www.lanacion.com.ar/1154395-la-importancia-que-tiene-la-napa-freatica-en-los-cultivos>
- Vásquez, E. (2017). *Constante dieléctrica del agua*. Recuperado el 03 de 28 de 2016, de UNAM:
<http://laguna.fmedic.unam.mx/~evazquez/0403/constante%20dielectrica%20agua.html>
- Villaviciencio, A., & Villablanca, A. (2010). *Determinación del coeficiente de Uniformidad de Riego*. Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Investigación Especializado en Agricultura del Desierto y Altiplano.
- Yunus, Ç. (2009). *Termodinámica*. (6 ed.). España: McGraw-Hill.

2.10 APÉNDICES



Figura 78A. Distribución de tubos piezométricos en la primera localidad de la Investigación ubicada en el lote 521 de la finca Agrícola del Sur

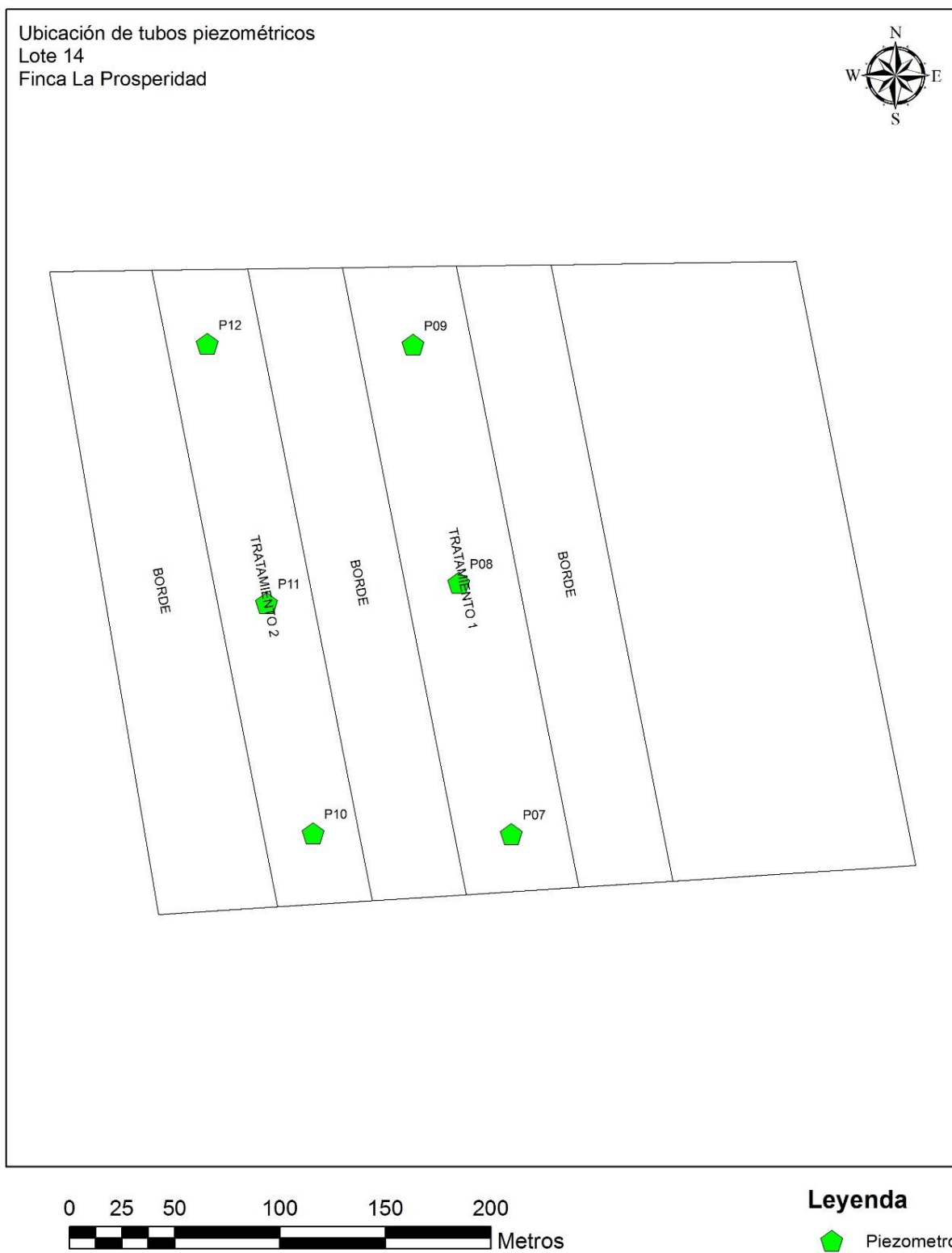


Figura 79A. Distribución de tubos piezométricos en la segunda localidad de la Investigación ubicada en el lote 14 de la finca La Prosperidad

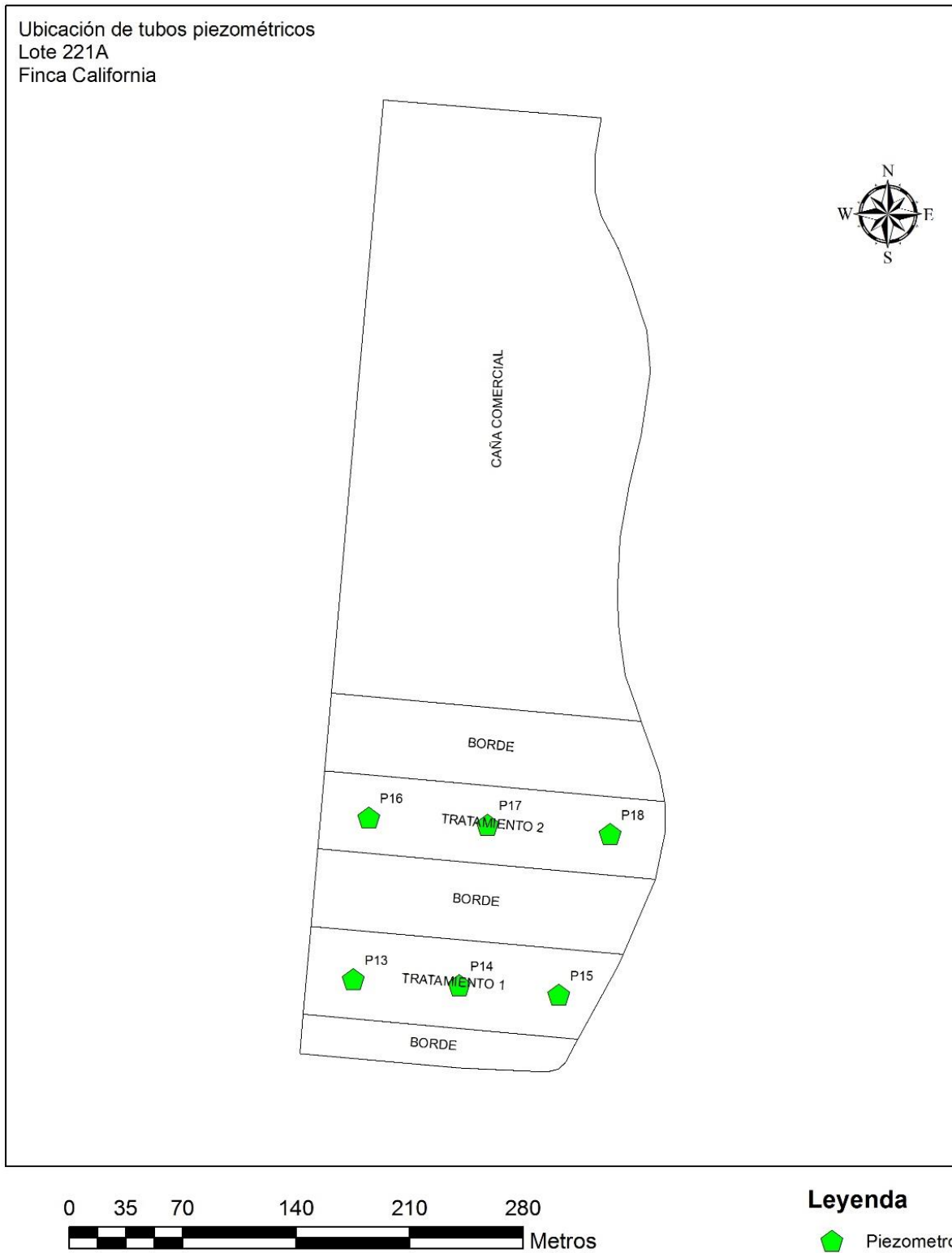


Figura 80A. Distribución de tubos piezométricos en la tercera localidad de la Investigación ubicada en el lote 221A de la finca California



Figura 81A. Ubicación de puntos de medición de humedad con sonda FDR en unidades experimentales de la localidad uno, finca Agrícola del Sur



Figura 82A. Ubicación de puntos de medición de humedad con sonda FDR en unidades experimentales de la localidad dos, finca La Prosperidad



Figura 83A. Ubicación de puntos de medición de humedad con sonda FDR en unidades experimentales de la localidad tres, finca California

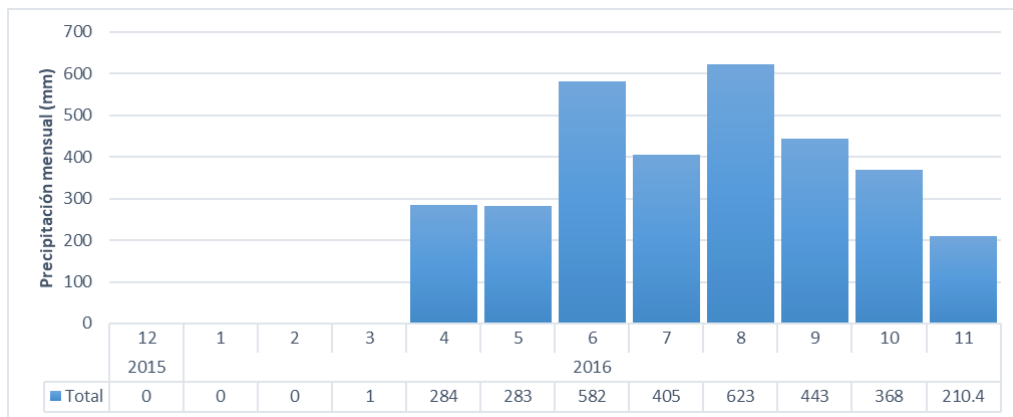


Figura 84A. Precipitación mensual registrada en la localidad uno, finca Agrícola del Sur

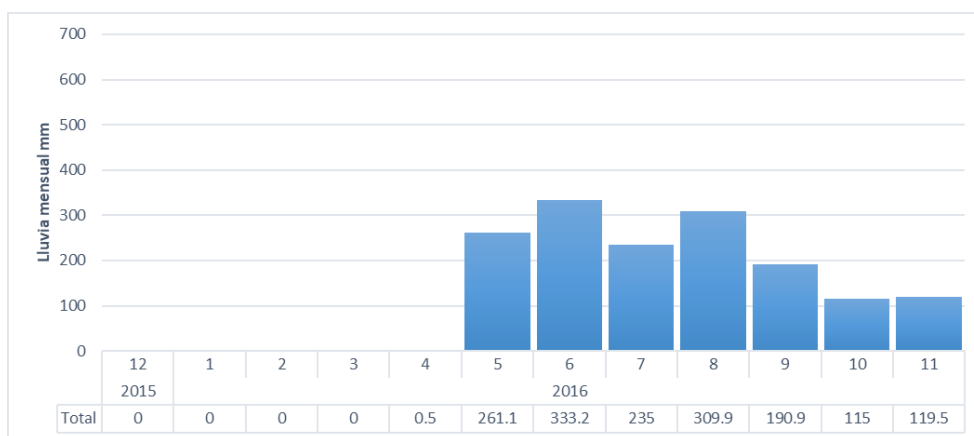


Figura 85A. Precipitación mensual registrada en la localidad dos, finca La Prosperidad

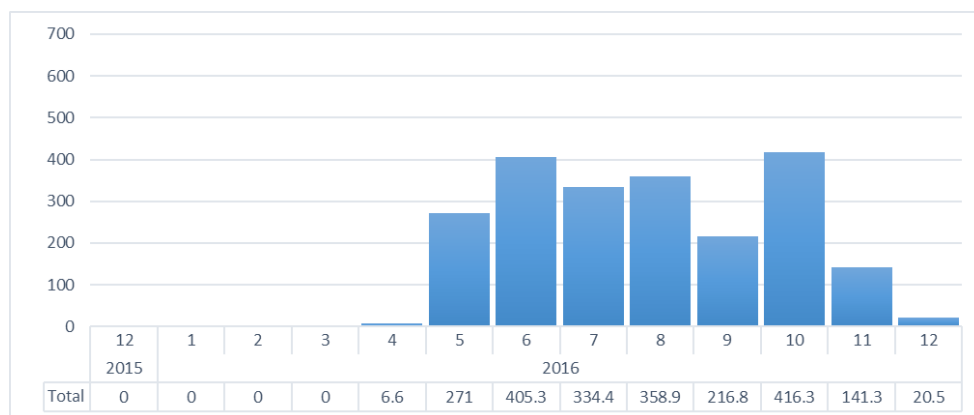


Figura 86A. Precipitación mensual registrada en la localidad tres, finca California

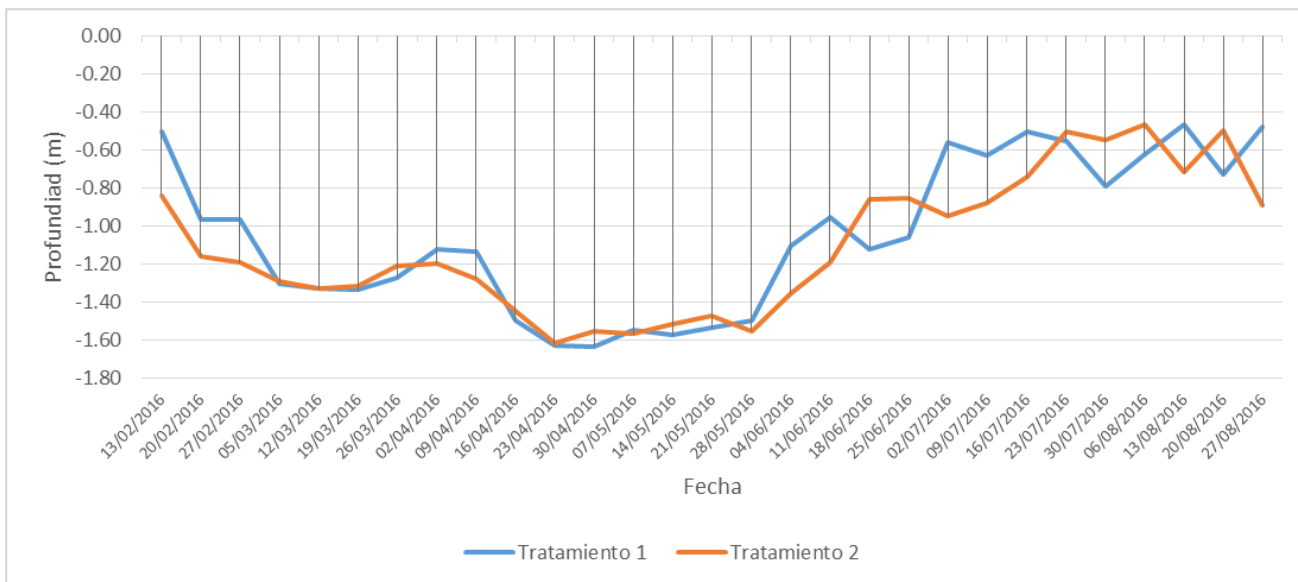


Figura 87A. Comportamiento de la capa freática la finca California

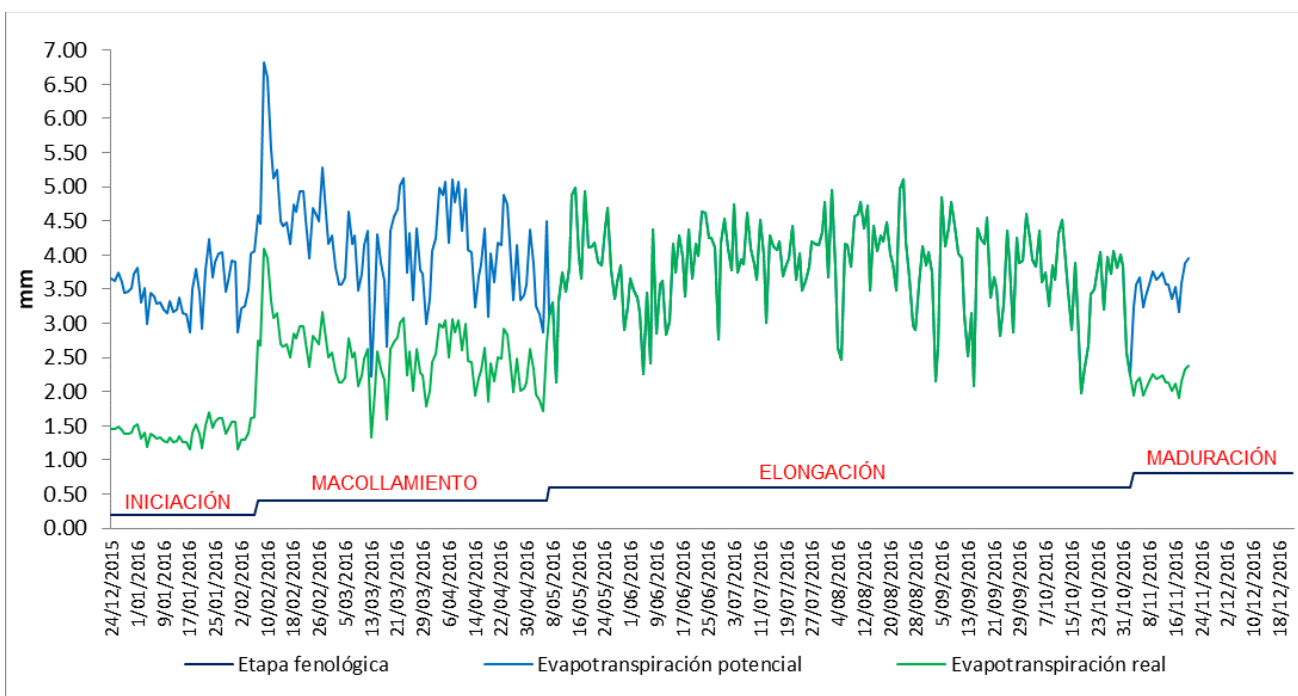


Figura 88A. Dinámica de la Eto y Etr en el ciclo fenológico del cultivo en la localidad uno, finca Agrícola del Sur

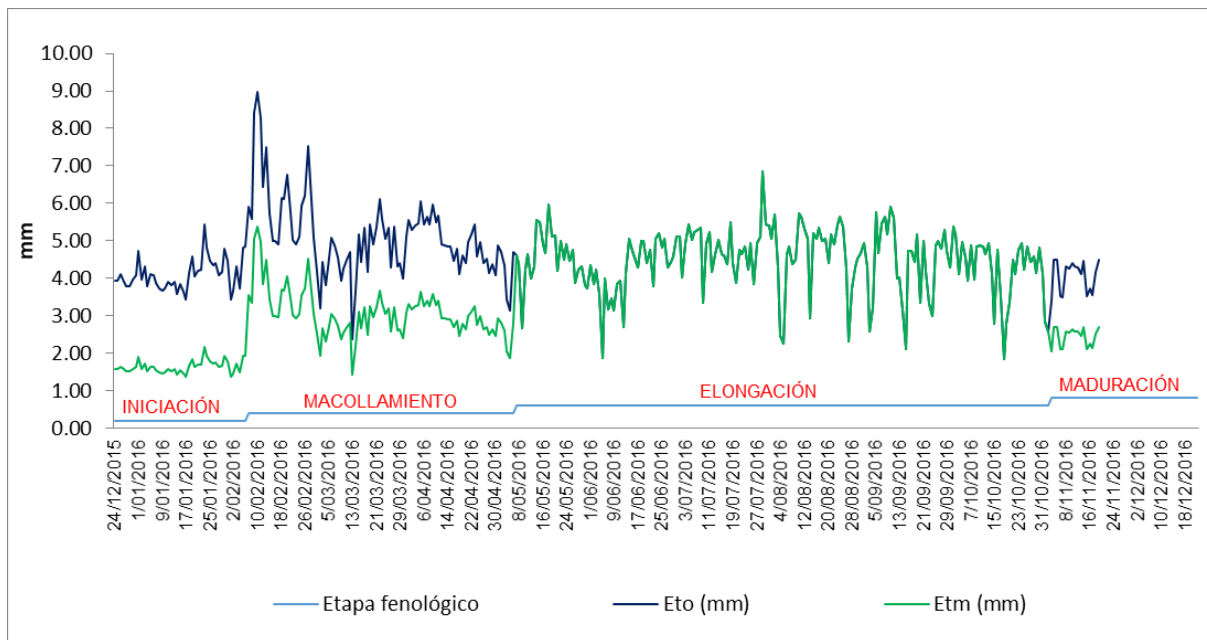


Figura 89A. Dinámica de la Eto y Etr en el ciclo fenológico del cultivo en la localidad dos, finca La Prosperidad

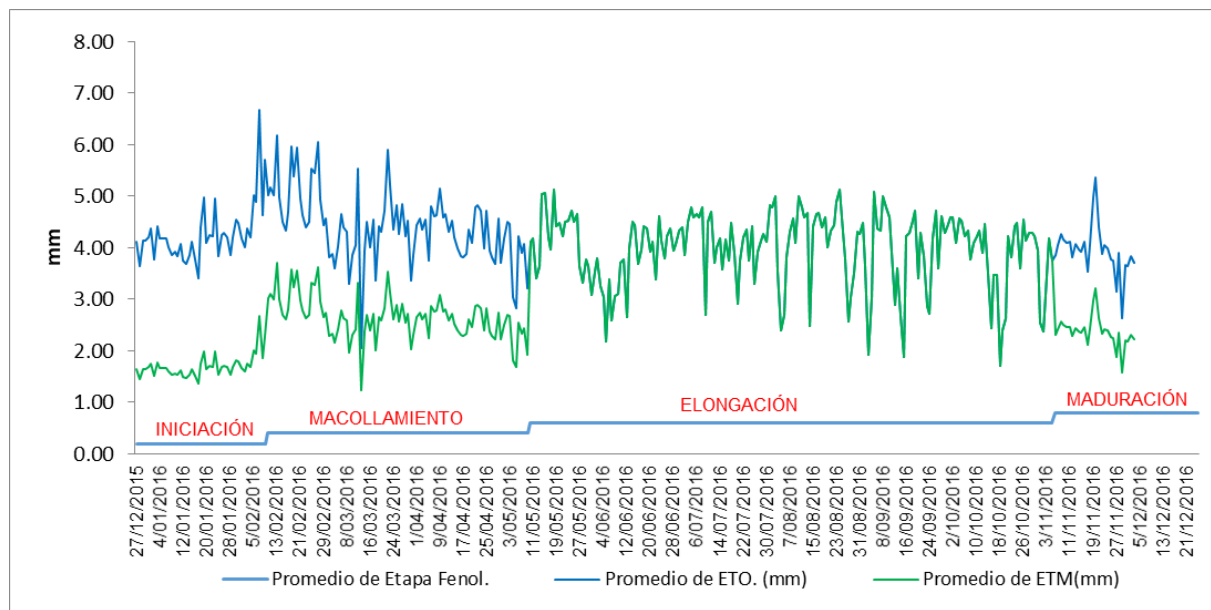


Figura 90A. Dinámica de la Eto y Etr en el ciclo fenológico del cultivo en la localidad tres, finca California

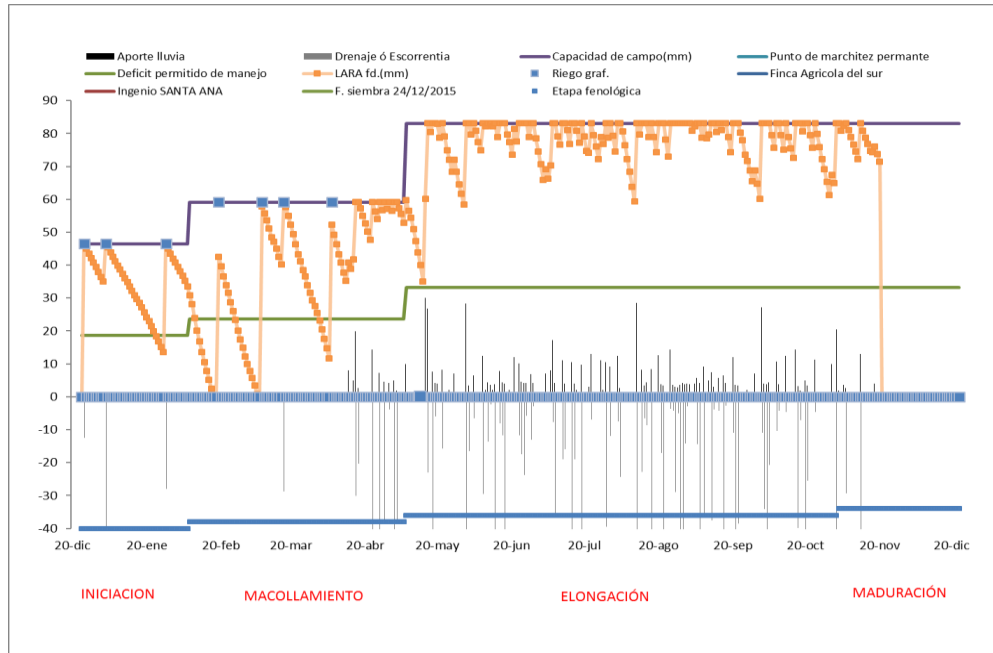


Figura 91A. Balance hídrico diario del testigo relativo de finca Agrícola del Sur

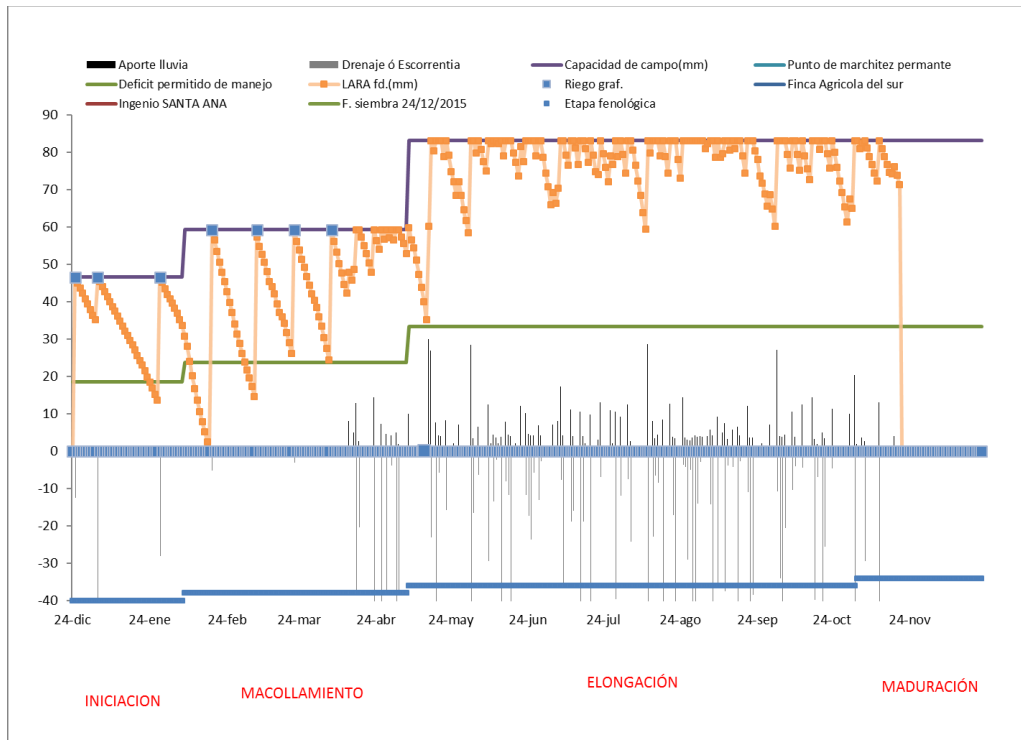


Figura 92A. Balance hídrico diario del tratamiento dos de finca Agrícola del Sur

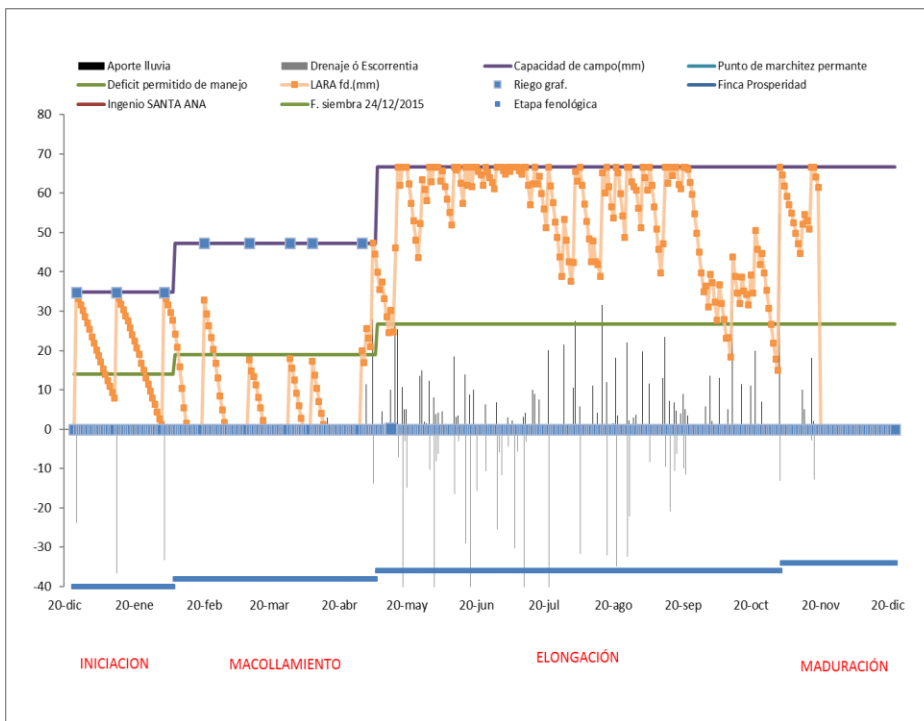


Figura 93A. Balance hídrico diario del testigo relativo de finca La Prosperidad

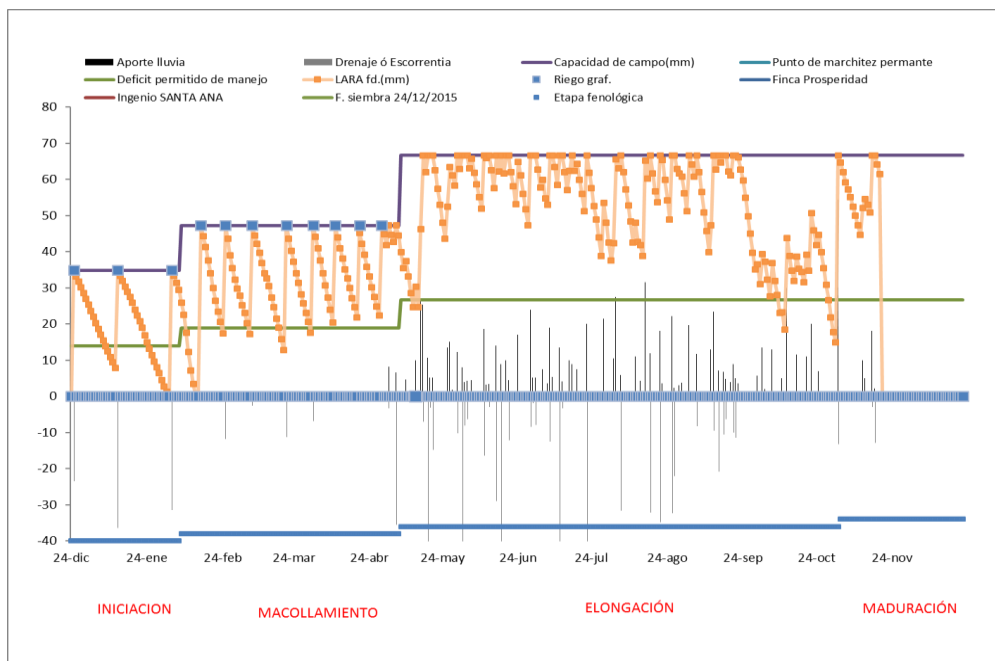


Figura 94A. Balance hídrico diario del tratamiento dos de finca La Prosperidad

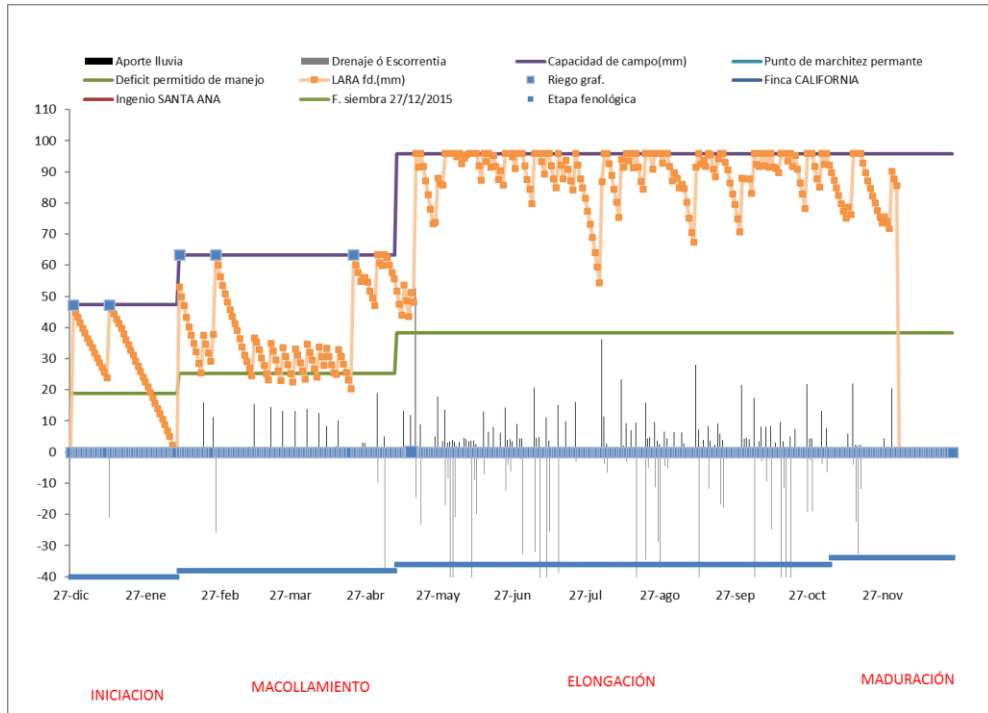


Figura 95A. Balance hídrico diario del testigo relativo de finca California

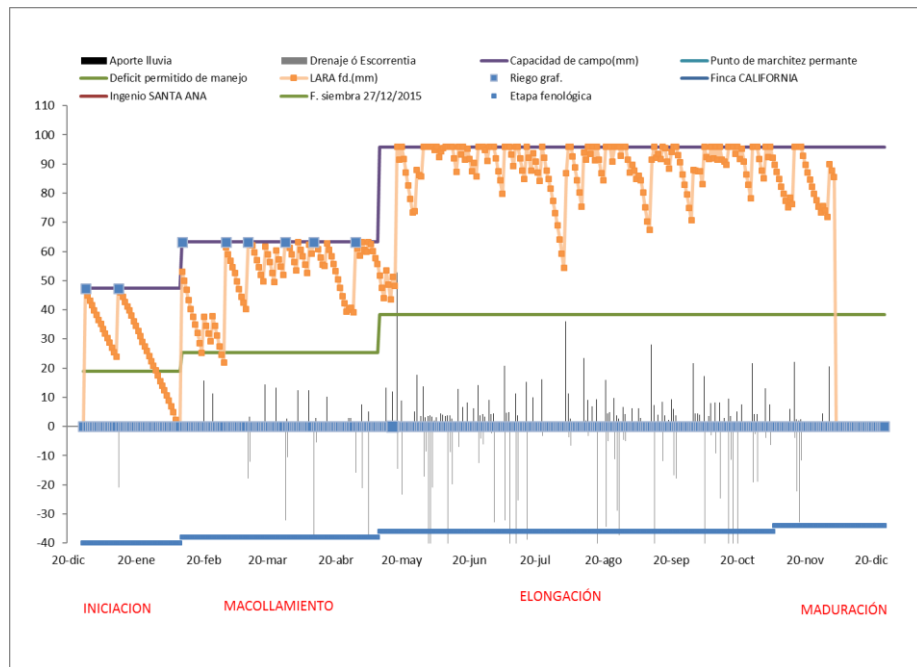


Figura 96A. Balance hídrico diario del tratamiento dos de finca California

Procedimiento utilizado para el desarrollo del balance hídrico y la estimación de la humedad en el suelo

Un balance hídrico funciona como una contabilidad del agua en el suelo, sumando ingresos de humedad y restando los egresos. Para ello es necesario contar con información precisa de las variables que influyen en el contenido de humedad.

El balance hídrico relaciona las variables suelo, planta, atmosfera, nivel freático y manejo del riego en el cultivo para estimar el contenido de humedad, información relevante para la planificación del riego, respondiendo a las preguntas ¿Cuándo? y ¿Cuánto regar?

Cada una de las variables sirven para caracterizar el ámbito para el que se desarrollará la estimación de humedad a través del balance hídrico, de la forma siguiente:

- Suelo: Necesario para caracterizar el medio poroso, su capacidad de almacenamiento.
- Planta: Para conocer la duración de las etapas fisiológicas y los niveles de requerimiento hídrico en cada una.
- Atmosfera: necesario para conocer los niveles de evapotranspiración potencial en la región y registros de lluvia.
- Nivel freático: para la estimación del aporte de agua por capilaridad.
- Riego: Determinación de lámina de agua aplicada anteriormente a través del riego.

Menú BH

El balance hídrico para funcionar necesita, en primera instancia, recopilar la información necesaria para realizar las estimaciones (figura 97A). Para lo cual requiere que se alimente con la información referente al cultivo, suelo, clima y riego, tal como se observa en el menú del sistema.

SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN EL CICLO DEL CULTIVO					
FECHA ACTUALIZACIÓN		INGENIO		ENCARGADO ó RESPONSABLE	
DATOS A INGRESAR (hacer click en cada uno de los componentes)					
No.	COMPONENTE	Descripción		PAG	
1	CAÑA	Se registra toda la información referente al cultivo. INFORMACIÓN NECESARIA.			
2	SUELO	Descripción del suelo, características físicas. INFORMACIÓN NECESARIA.			
3	CLIMA	Registro de información de variables meteorológicas			
	LLUVIA-DIARIA	Seleccionar este componente en caso de no tener variables meteorológicas (T ^o C, HR%, Rg y V.V) diarias.			
4	RIEGO (O. ACTUAL)	Funcionamiento del sistema y programación. En comparaciones históricas ingresar la información de la operación del riego requerida.			
RESULTADOS					
1	EVAPOTRANSPIRACION	Estimación de la evapotranspiración potencial con base a la ecuación de PENMAN MONTEITH.			
2	BALANCE ENERGÉTICO	Comportamiento de la radiación solar respecto en la superficie terrestre y su comparación con la energía que llega al límite de la atmosfera, Latitud 14°.			
3	BH - MANEJO ACTUAL DEL RIEGO	Monitoreo del comportamiento de la humedad en el suelo.			
	BH - SIMULADO				

Fuente: Sistema de balance Hídrico Cengicaña, 2016

Figura 97A. Menú Balance hídrico

Cultivo: Caña

Los primeros datos en registrar son las coordenadas en las que se ubica el lote, pante o parcela que se desea monitorear, esta información será utilizada posteriormente por el sistema para determinar algunos parámetros meteorológicos, la información sobre fecha de siembra es muy importante, sobre ello se determinará la edad del cultivo y la etapa fenológica en la que se encuentra y por ende el coeficiente K del cultivo y su profundidad radicular, parámetros que tienen que definirse en esta misma pantalla para cada una de las etapas fenológicas (figura 98A).

INFORMACION GENERAL					
Ubicación del área del cultivo - <i>Ingresar información en celdas de color amarillo.</i>					
Ingenio		Área física de cobertura de riego (Has)			
Finca		Georeferencia	Latitud		
Estrato Altitudinal			Longitud		
Código de Finca		Variedad			
Código de Lote (s)		F. Siembra ó Corte		Día	Mes
Sistema de riego		Número de cortes			Año
Código del equipo		Fecha programada del próximo corte			

Características agronomicas del cultivo				
<i>Etapas del Cultivo</i>				
Etapas	Duración	F. Finalización	Kc	Prof. Radicular (cm)
Iniciación				
Macollamiento				
Elongación				
Maduración				

Fuente: Sistema de balance Hídrico Cengicaña, 2016

Figura 98A. Menú caña

Suelo

Para el desarrollo del balance hídrico se requiere tener información sobre las características físicas del suelo del área a monitorear, esto incluye la capacidad de campo, punto de marchitez permanente, y la densidad aparente, en los distintos estratos del suelo (figura 99A).

CARACTERISTICAS EDAFICAS DEL SUELO						
<i>Ingresar información en celdas de color amarillo.</i>						
Estrato			Textura	%CC	% PMP	D.A.P.(gr/cc)
No.	DE	A				
1	0	30				
2	30	40				
3	40	50				
4						
5						
6						

Nota: CC= Capacidad de campo, PMP= Punto marchitez permanente ,
Dap= Densidad aparente

Fuente: Sistema de balance Hídrico Cengicaña, 2016

Figura 99A. Menú suelo

Clima

Para conocer la humedad del suelo con un balance hídrico es necesario estimar la evapotranspiración potencial en el área, por lo que se utiliza información meteorológica de la estación más cercana. Los datos utilizados para realizar estas estimaciones dentro del balance hídrico son: coordenadas de la estación meteorológica, Temperatura media, mínima y máxima (en °C), la radiación diaria acumulada en (W/m^2), la humedad relativa mínima y máxima (en porcentaje) y la velocidad de viento (en Km/hr).

FUENTES DE INFORMACION		FUENTE DE INFORMACIÓN METEOROLOGICA DIARIA, CONSULTAR LA PAGINA WEB						
Estación Meteorologica - ICC								
Ubicación pluviómetro:		Latitud:		Longitud:		http://redmet.icc.org.gt/		
CONDICIONES CLIMATICAS								
No	FECHA	T° Media (°C)	T Min	T° Max (°C)	Radiación diaria acumulada (W/m^2)	HR Mínima (%)	HR Máxima (%)	Viento Media (Km/h)
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Fuente: Sistema de balance Hídrico Cengicaña, 2016

Figura 100A. Información meteorológica requerida para estimar la evapotranspiración potencial en área

Para el efecto, se descarga la información diariamente de los servidores de la red meteorológica del Instituto Privado de Investigaciones sobre Cambio Climático -ICC- a través de la dirección web <https://redmet.icc.org.gt/login> con usuario y contraseña que puede solicitarse de forma gratuita a la institución (figura 101A).




**Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático**

**Bienvenidos al Sistema de Información Meteorológica
del ICC**

Con el objetivo de crear una base de datos de los usuarios de la información meteorológica de la costa sur del país, lo invitamos a registrarse gratuitamente en nuestra página.

Dicho registro le permitirá consultar la información meteorológica en tiempo real, así como consultar y descargar la base de datos histórica de nuestra red de estaciones meteorológicas automáticas.

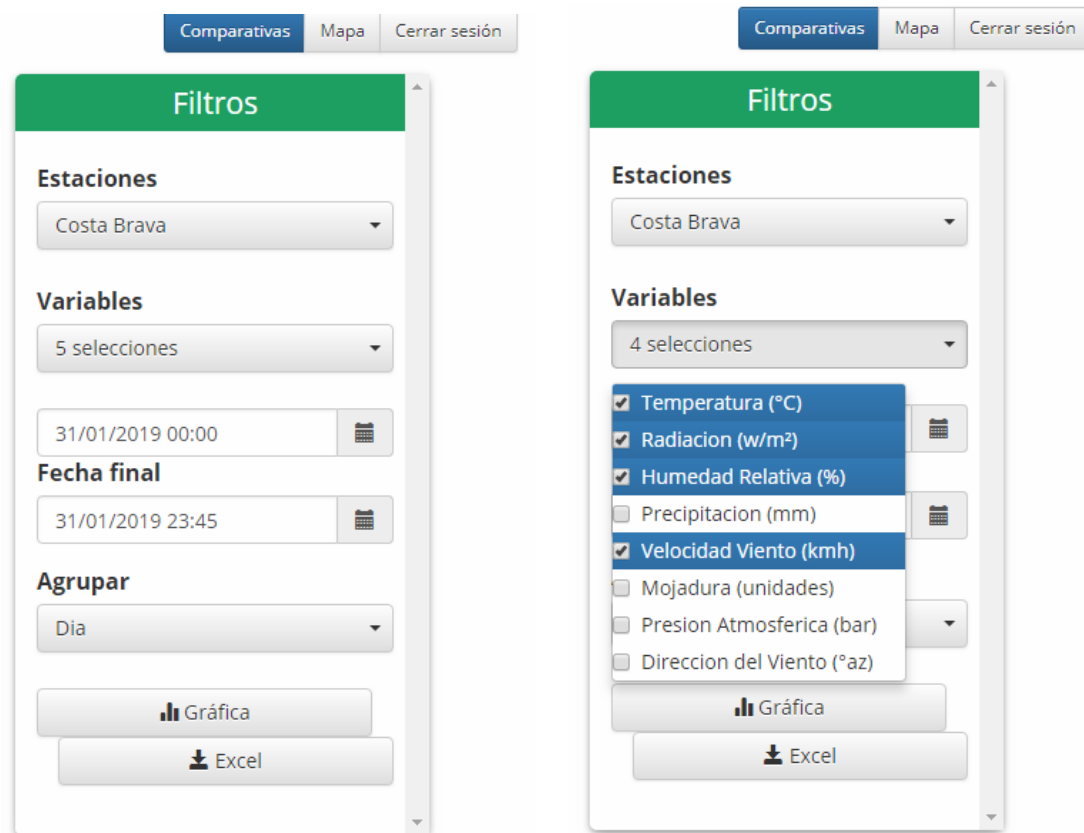
Recuérdame

[¿Olvidaste tu contraseña? Regístrate](#)
Iniciar Sesión

Fuente: Redmet-ICC, 2016

Figura 101A. Menú de ingreso a base de datos de Red Meteorológica de ICC

Ingresado al sitio web se selecciona la opción comparativa, se selecciona la opción **Comparativa** que presentará el menú de la figura siguiente. Dentro del menú se selecciona la estación meteorológica de interés, las variables que se desean recopilar, para el efecto se selecciona **Temperatura, Radiación, Humedad relativa y Velocidad de viento** (figura 102A). En el menú se especifica la fecha o intervalos de fecha del cual se desea recopilar la información, el sistema de agrupación a seleccionar es **Día** y se descarga la información en un archivo de formato .csv.



Fuente: Redmet-ICC, 2016

Figura 102A. Menú de descarga de información de sitio redmet de ICC

La información descargada alimenta el sistema del balance hídrico y con ello inicia a realizar los cálculos respectivos para determinar la evapotranspiración potencial. Es de recordar que el modelo de Penman-Monteith considera las variables R_n (radiación neta en la superficie del cultivo en $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{día}$), R_a (radiación extraterrestre en mm/día), G (flujo de calor de suelo en $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{día}$), T (la temperatura media en $^{\circ}\text{C}$), u_2 (la velocidad del viento en m/s), e_s (la presión de vapor de saturación en kPa), e_a (la presión real de vapor en kPa), $(e_s - e_a)$ es el déficit de presión de vapor en kPa , Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor en $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$, y γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$) para determinar la evapotranspiración en mm/día (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

$$Et_0 = \frac{0.408 * \Delta(R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 * u_2)}$$

Teniendo en cuenta el modelo para la estimación de la evapotranspiración el sistema de cálculo realiza varias transformaciones para llevar los datos obtenidos de la red meteorológica a las dimensiones que corresponden para realizar el cálculo.

Transformación de W/m² a MJ/m²*día

Una de las primeras transformaciones que realiza el sistema es la transformación de la radiación acumulada del día en W/m² a MJ/m², considerando en el watt es una unidad de medida de Potencia y el joule de energía, se transforma la potencia en energía utilizando el modelo $P=E/t$, donde P es la potencia, E la energía y t el tiempo. De esta forma, un acumulado diario de 21,053.5 watt/m² equivale a 18.95 MJ/m² al transformarla, considerando que las lecturas en la estación meteorológica se realizan cada 15 minutos. Para obtener la potencia media medida durante el día se divide el valor acumulado obtenido durante el día entre las 24 horas del día y los 4 registros que se toman por hora, siguiendo con el ejemplo anterior el proceso sería el siguiente:

$$Potencia\ media\ \left(\frac{watt}{m^2}\right) = \frac{Potencia\ acumulada\ \left(\frac{watt}{m^2\ día}\right)}{registros\ por\ día} = \frac{21,053.5\ \frac{watt}{m^2\ día}}{96\ registros/día} = 219.31\ watt/m^2$$

A sabiendas que la potencia es Energía/tiempo se puede estimar la cantidad de energía recibida durante el día multiplicándola por los segundos que componen un día.

$$\frac{219.31\ Watt}{m^2} = \frac{219.31\ J/s}{m^2} \rightarrow \frac{219.31\ Watt}{m^2} * \frac{86,400\ segundos}{día} = \frac{18.95\ MJ}{m^2} = R_n$$

Otras variables como la radiación extraterrestre se obtienen tomando en cuenta la latitud y longitud en la que se encuentra la estación meteorológica, teniendo en cuenta parámetros como la distancia relativa inversa Tierra-sol, el ángulo de radiación a la puesta del sol, la declinación solar, la duración máxima de la insolación y la fecha en la que se realiza la insolación.

Riego

El registro del riego se realiza tomando en cuenta la fecha y la lámina neta aplicada, para lo cual se realizan pruebas de uniformidad de riego para determinar la lámina de agua aplicada por evento de riego.

OPERACIÓN DEL RIEGO					
Planificación del riego			Programación de riegos (postcorte & Precorte)		
Metodo de riego			Post Corte	Fecha primer riego	
Deficit permitido				Fecha último riego	
Lámina neta/riego (mm)			Precorte	Fecha primer riego	
Eficiencia de Riego				Fecha último riego	
Frecuencia de riego (días)			Último riego (Días antes del corte)		
Tiempo de riego (hrs)			Primer riego (días después del Corte)		
Lámina aplicada en 1er. Riego (mm)			Fecha de cosecha		
Lámina de humeda inicial (mm)					
Riego postcorte			Riego precorte		
Inicio	Días deficit	Finalizacion	Inicio	Días deficit	Finalizacion
REGISTRO DE RIEGOS - Ingresar la fecha y lámina de riego aplicada en celdas amarillas.					
Etapa fenológica	No. Riego	FECHA	LÁMINA NETA (mm)	Observaciones	
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				

Fuente: Sistema de balance Hídrico Cengicaña, 2016

Figura 103A. Menú registro de riegos en Balance hídrico



Figura 104A. Muestreo de suelos en área de investigación



Figura 105A. Instalación de puntos de monitoreo con sonda FDR en área de investigación



Figura 106A. Realización de pruebas de uniformidad de riego durante evento de riego en área de investigación



Figura 107A. Georreferenciación de puntos de muestreo de dentro de lote de investigación



Figura 108A. Instalación de tubos piezométricos para monitoreo de nivel freático en área de investigación



CAPITULO III

**INFORME DE SERVICIOS PRESTADOS AL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
AGRÍCOLA, INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.**

3.1 PRESENTACIÓN

El presente capítulo describe los servicios efectuados durante el Ejercicio Profesional Supervisado (EPS), que se llevó a cabo en los meses de febrero a noviembre de 2016, en el Departamento de Ingeniería Agrícola del Ingenio Santa Ana, ubicado en el municipio de Escuintla.

Los servicios fueron propuestos con el objetivo de colaborar en la ejecución de actividades identificadas en el diagnóstico y priorizadas por el Área de Riego del Departamento de Ingeniería Agrícola.

Entre los problemas identificados se encuentra la escasez de información para la administración del riego en puntos críticos de las distintas fincas del ingenio, áreas con alto contenido de arcilla o con vetas arenosas que requieren manejos enfocados en el uso eficiente del agua para la toma de decisiones sobre tiempos y frecuencias de riego, para ello se llevó a cabo el servicio de monitoreo de la humedad del suelo usando sondas de capacitancia tipo FDR.

La evaluación de la uniformidad de riego es una de las actividades más importantes realizadas por el Área de Riegos, del Departamento de Ingeniería Agrícola; esta actividad se enfoca en auditar la calidad del riego por aspersión en las distintas fincas del ingenio, la evaluación sirve para monitorear el coeficiente de uniformidad de riego usando el método de Christiansen, determinar la uniformidad de distribución del agua dentro de la parcela regada, la lámina promedio aplicada por evento de riego y la eficiencia del sistema, actividades que formaron parte del segundo servicio a prestado al Departamento de Ingeniería Agrícola.

3.2 SERVICIO I. MONITOREO DE LA HUMEDAD DEL SUELO USANDO SONIDAS DE CAPACITANCIA TIPO FDR EN ÁREAS CRÍTICAS DEL INGENIO SANTA ANA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.

3.2.1 Definición del problema

El Ingenio Santa Ana tiene una extensión de 25,934.02 ha, divididas en 7 administraciones, con 94.24 % del área bajo riego, y 4.73 % ocupada por vetas arenosas, considerados puntos críticos de control de riego por su baja capacidad de retención de agua, lo que requiere de herramientas precisas para la toma de decisión sobre tiempos y frecuencias de riego.

Una sonda de capacitancia, tipo FDR, es un sistema con sensores de capacitancia eléctrica que estiman el contenido volumétrico de agua en el suelo a diferentes profundidades, en cualquier momento (Diestre, 2011). Con esta información se proyecta la fecha próxima de riego y lámina de agua a aplicar áreas críticas.

3.2.2 Objetivos

A. Objetivo General

Monitorear la humedad del suelo en puntos críticos de las fincas del Ingenio Santa Ana.

B. Objetivos Específicos

1. Instalar sondas FDR en zonas críticas del área productiva del ingenio.
2. Monitorear el contenido de humedad del suelo de las áreas productivas del ingenio.
3. Generar informes semanales sobre el contenido de humedad del suelo en cada uno de los puntos de medición.

3.2.3 Metodología

A. Selección de puntos de medición

Para la priorización y selección del punto de medición de humedad se tomó en cuenta la topografía del terreno, la textura de suelo, y el sistema de riego usado en los distintos lotes.

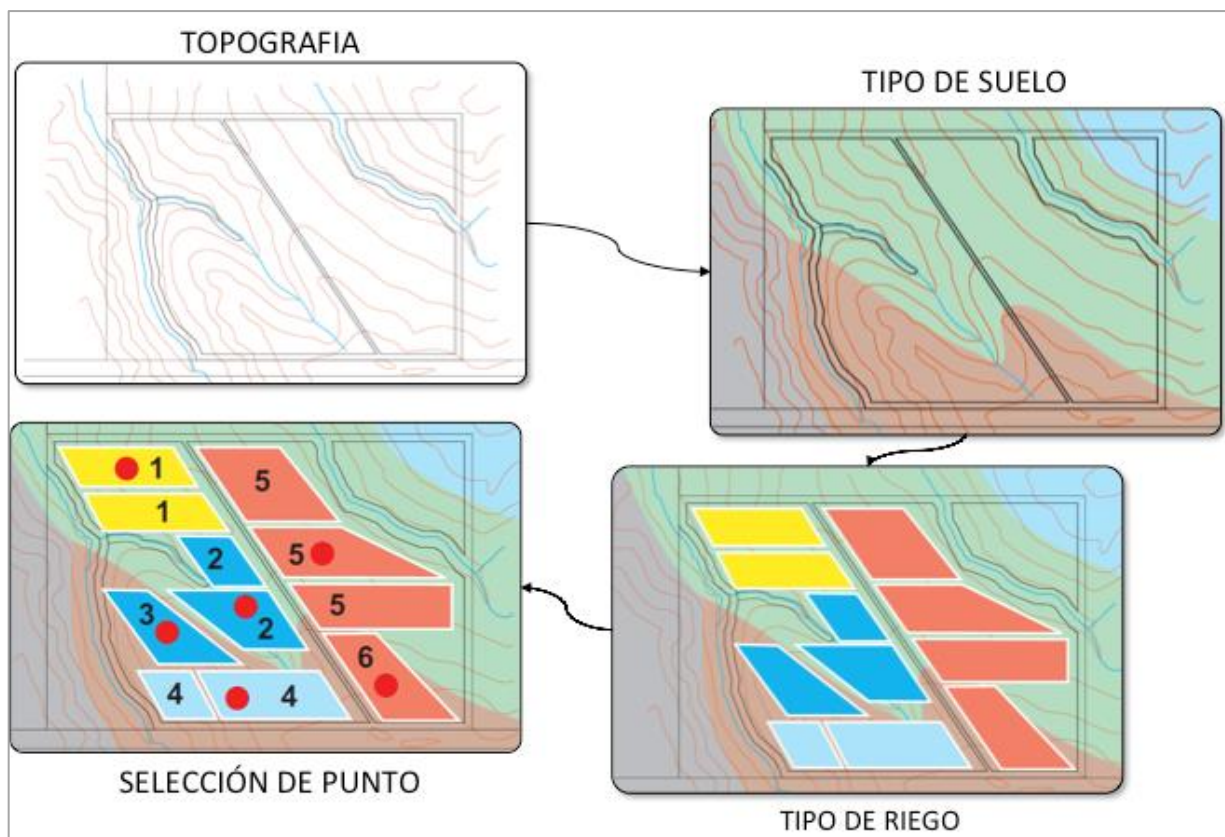


Figura 109. Criterio de selección de punto de medición de humedad

B. Instalación de tubos

En cada punto de medición se instaló un tubo con un metro de longitud y diámetro de 2 pulgadas, el cual sirve de aislante para la sonda al realizar las mediciones de humedad del suelo. Cada tubo fue enterrado verticalmente en el suelo usando un barreno, cuidando de que sobresaliera 15 cm, se limpió internamente y se le enroscó un corcho en la base para impedir el paso del agua, de esta forma garantizar que la sonda humedad pueda realizar una buena medición.

Al finalizar la instalación del tubo, se realizó la primera medición de humedad para asegurar el buen funcionamiento del equipo, una vez concluida la medición y asegurado el funcionamiento del equipo se procedió a identificar el punto de medición y su georreferenciación. Este proceso se detalla en la figura 110.



Figura 110. Diagrama de proceso de instalación del tubo de acceso para la medición de humedad con sondas FDR

El Departamento de Ingeniería Agrícola contaba con equipo para monitorear 99 puntos en todo el ingenio. Por ello cada equipo se instaló estratégicamente en áreas críticas de las fincas.

C. Medición de humedad

La medición de humedad se realizó durante la zafra 2015/16, llevándose a cabo dos veces por semana. El proceso de medición consistió en ubicar cada punto de medición, se verificó el código del punto, se desenroscó el tapón del tubo, se instaló la sonda al equipo DIVINER 2000[®], se introdujo la sonda al tubo de medición el cual registraba datos de humedad cada 10 centímetros hasta llegar a una profundidad de 70 centímetros, se verificó en el equipo DIVINER 2000[®] el registro del dato, se extrajo la sonda del tubo de medición, se enroscó la tapa y se continuó con la ubicación del siguiente punto (figura 111).

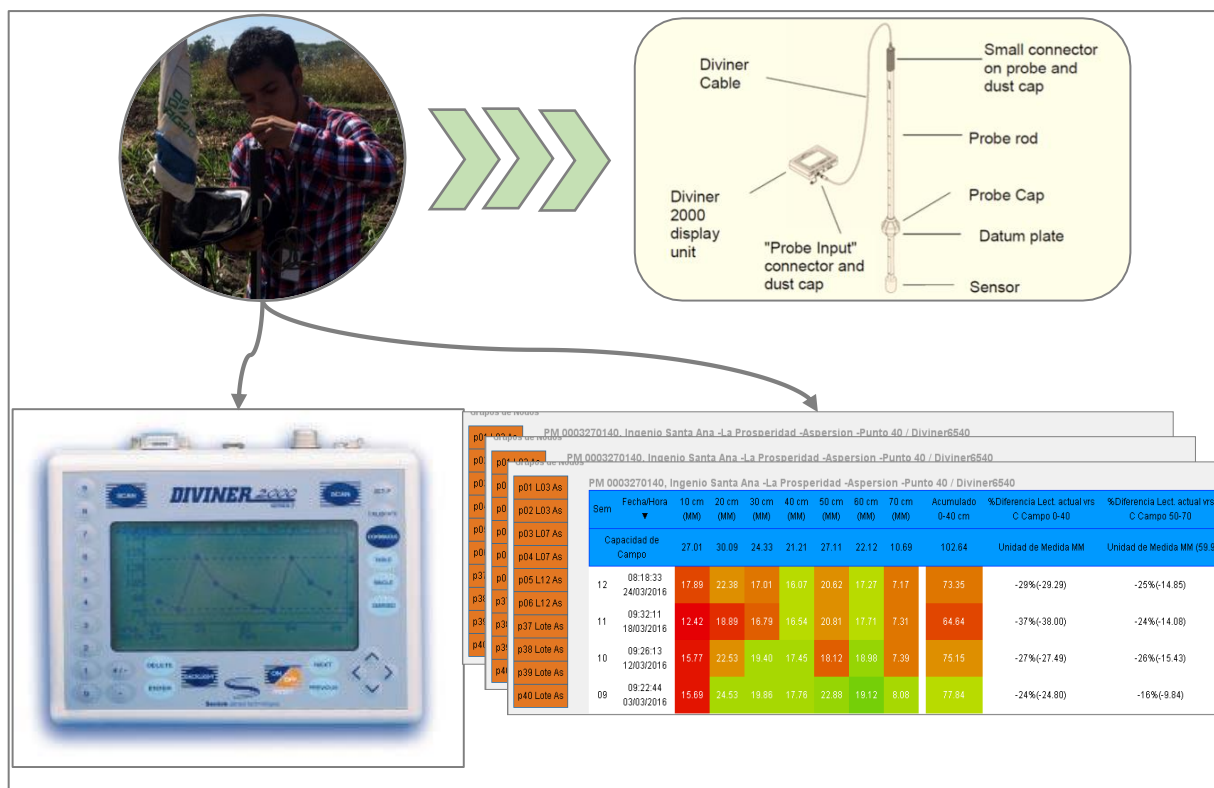


Figura 111. Toma de datos de humedad de suelo en campo usando sondas de capacitancia FDR

D. Almacenamiento y actualización de datos

El equipo DIVINER 2000® recopiló en cada medición los datos de humedad, y al final del día estos fueron descargados y registrados en la aplicación Agromap®, que actualizó la información de cada sensor de humedad y lo relacionó con la ubicación geográfica de los puntos de medición registrado al instalar los tubos de medición, para ubicar cada medición en un plano.



Fuente: Agromap®, 2016

Figura 112. Visualización puntos de medición de humedad de suelo en aplicación Agromap®

E. Interpretación de resultados y generación de informes

La información recopilada fue almacenada en la aplicación Agromap®, al finalizar la toma de datos fueron analizados para la generación de informes (figura 113). Dentro de la aplicación se visualiza cada punto de medición sobre un plano; se selecciona el punto a analizar, e inmediatamente genera una gráfica del comportamiento histórico del contenido de humedad del suelo a diferentes profundidades.



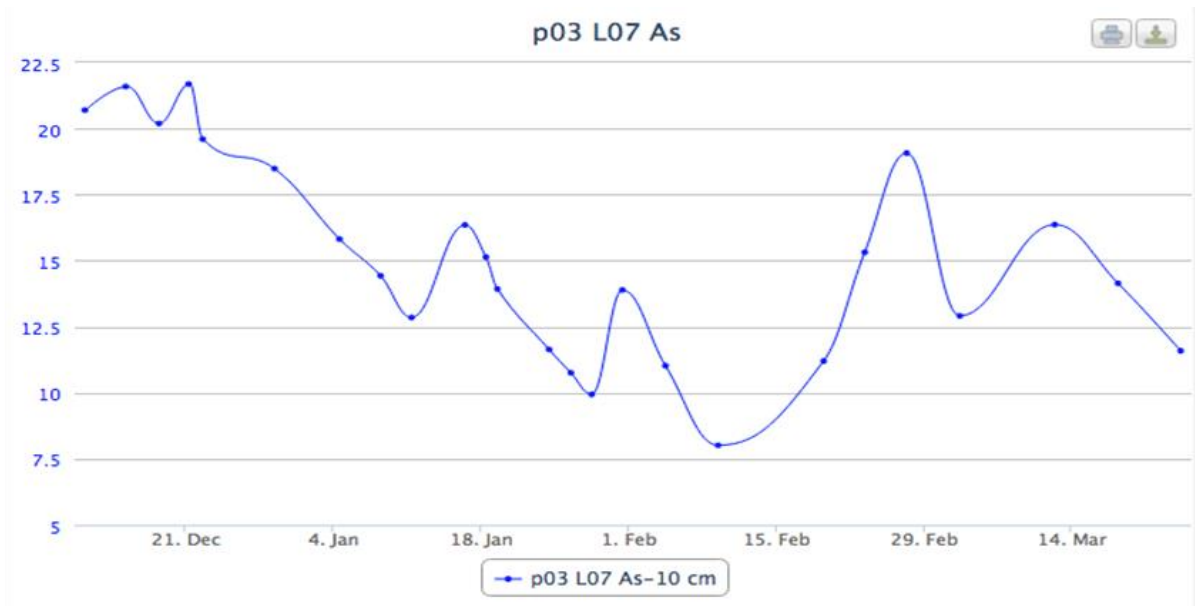
Fuente: Agromap®, 2016

Figura 113. Distribución de puntos de medición humedad dentro de finca La Prosperidad

Bajo la gráfica se encuentra expresado en milímetros el contenido de agua por cada 10 cm de suelo, estos datos se suman según el estado fenológico en el que se encuentre la caña, hasta llegar a 60 cm a partir de la elongación hasta la maduración. En iniciación, los primeros 45 días después de la siembra o corte de caña, se suma el contenido de agua de los primeros 20 cm de profundidad; en macollamiento, cuando la caña tiene una edad comprendida entre los 45 y 135 días, se suma el contenido de agua presente en los primeros 40 cm de profundidad, al iniciar el estado fenológico elongación el contenido de agua se obtiene sumando la humedad contenida hasta 60 cm de profundidad (figura 114).

El contenido de humedad determinado se comparó con la capacidad de campo, déficit permitido de manejo y punto de marchitez permanente del suelo encontrado en los lotes muestreados. Con el valor de evapotranspiración media, proporcionado por el Centro de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar -CENGICAÑA-, se determinó la

siguiente fecha de riego, y la diferencia entre la capacidad de campo y el déficit permitido de manejo se determinó la lámina de agua a regar; cuando el contenido de agua en el suelo es menor que el déficit permitido de manejo se enviaba una alerta a los jefes de zona para que se priorizara el riego en los lotes a los que correspondía la lectura.



PM 0003270146, Ingenio Santa Ana -California -Aspersión -Lote 221 A -Punto 46 / D									
Sem	Fecha/Hora	10 cm (MM)	20 cm (MM)	30 cm (MM)	40 cm (MM)	50 cm (MM)	60 cm (MM)	70 cm (MM)	Acumulado 0-40 cm
	Capacidad de Campo	28.51	38.93	36.23	36.53	35.21	35.45	33.91	140.2
09	10:25:06 04/03/2016	20.77	36.11	35.86	35.55	34.88	35.37	33.29	128.30
08	11:19:05 27/02/2016	26.38	38.97	36.61	36.87	35.18	36.36	34.38	138.84
08	09:20:09 24/02/2016	31.69	39.88	36.99	36.61	35.00	36.24	34.20	145.17
07	12:05:34 20/02/2016	18.84	36.36	36.11	37.06	35.00	36.11	34.26	128.38

Fuente: Agromap®, 2016

Figura 114. Informe generado por Agromap® sobre el contenido de humedad en el suelo por punto de medición

3.2.4 Evaluación

En el periodo de zafra 2015/16, entre el mes de diciembre de 2015 al mes de junio de 2016, se monitoreó la humedad del suelo usando sondas de capacitancia tipo FDR en un total de 68 puntos, distribuidos entre 5 de las siete regiones en las que se encuentra dividido las fincas del Ingenio Santa Ana, las regiones 1 y 7 no se les asignó ningún punto de medición.

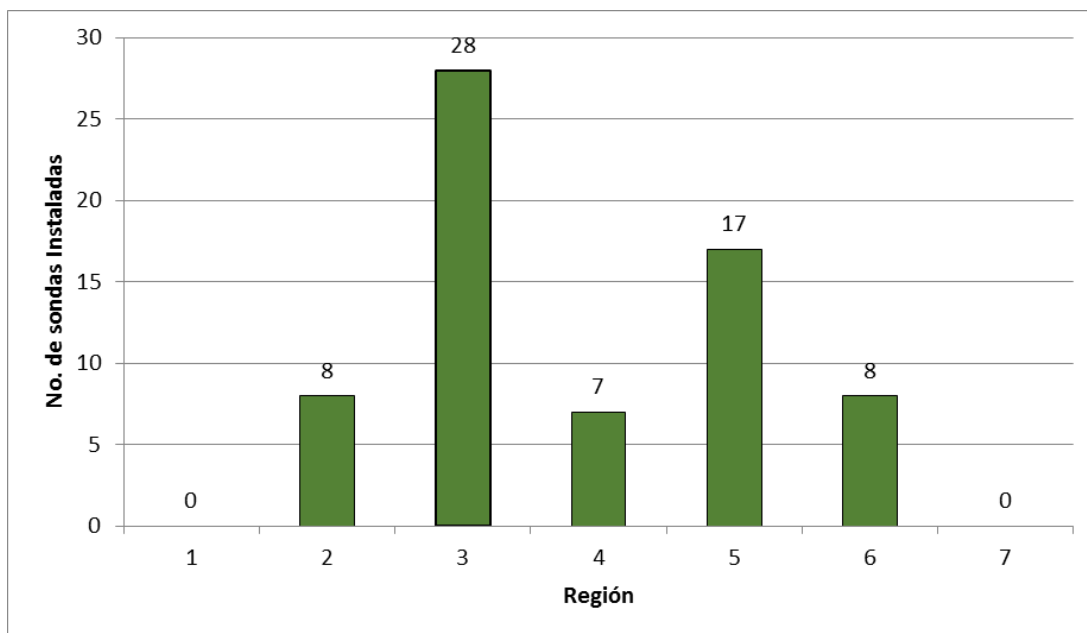


Figura 115. Gráfica de distribución de sondas de capacitancia tipo FDR, instaladas en fincas del Ingenio Santa Ana durante la zafra 2015/16

Esta distribución está estrechamente relacionada con la distribución de areneras dentro del ingenio, la región tres presenta la mayor extensión de vetas arenosas en comparación a las otras regiones, ocupando 11.8 % de la extensión de la región, representando 38 % del área total de areneras registradas dentro de las fincas del ingenio.

Las sondas de humedad permitieron conocer la dinámica del agua dentro de suelos con vetas arenosas permitiendo establecer frecuencias y tiempos de riego acorde a la cantidad de agua presente en el suelo, con ello se aportó la cantidad de agua requerido en el momento requerido a 1,226.76 ha de caña en todo el ingenio.

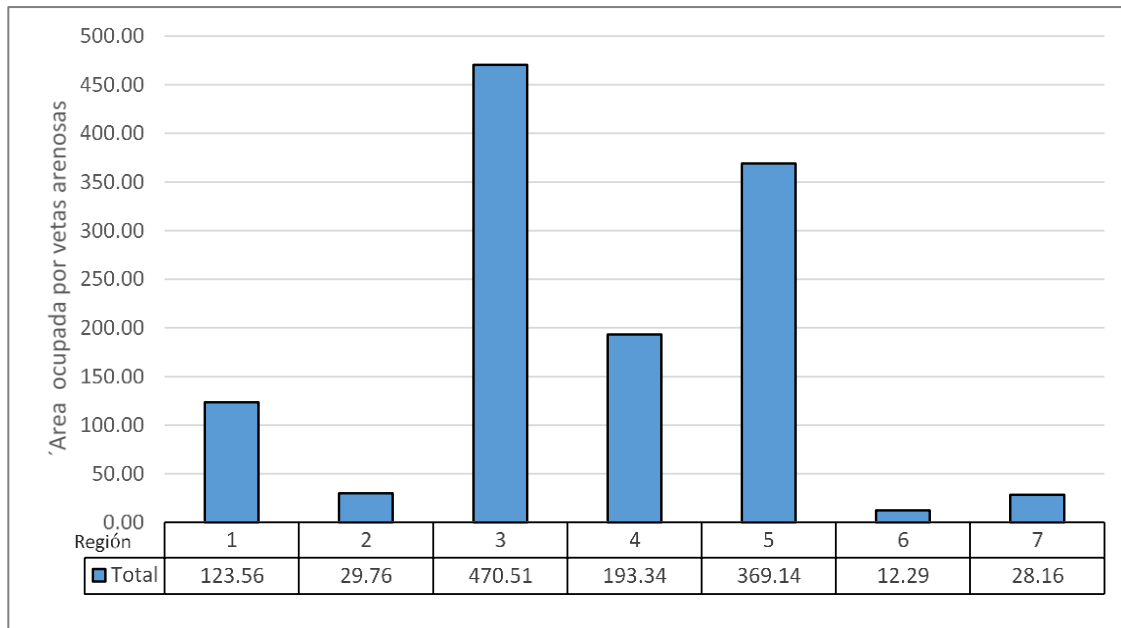


Figura 116. Extensión de betas arenosas dentro de regiones del Ingenio Santa Ana.

3.2.5 Constancias



Figura 117. Instalación de tubo para monitoreo de humedad en punto priorizado de finca



Figura 118. Ubicación de punto de muestreo de humedad con GPS Trimble R4®

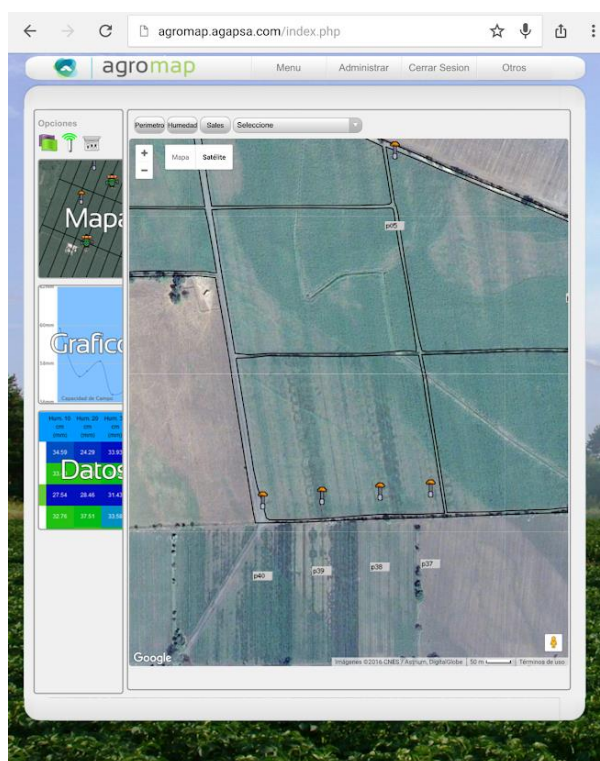


Figura 119. Inscripción de punto de muestreo en la plataforma Agromap®



Figura 120. Monitoreo de humedad usando la sonda FDR DIVINER 2000®

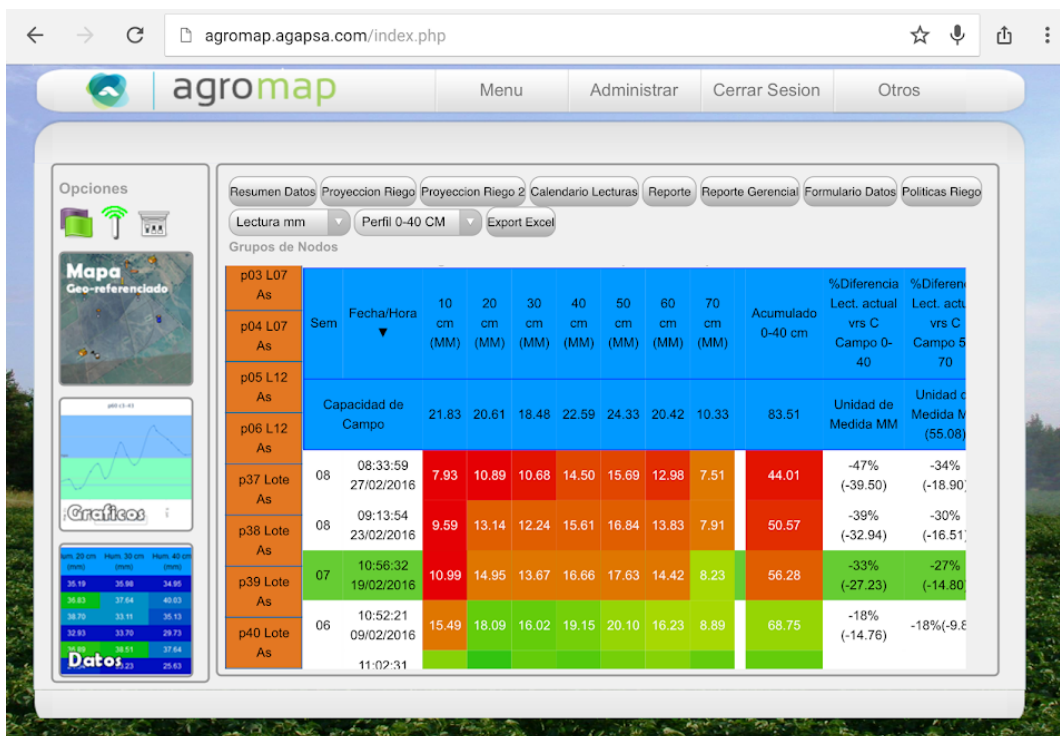


Figura 121. Generación de informe de monitoreo de humedad usando la plataforma de Agromap®

3.3 SERVICIO II. EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO POR ASPERSIÓN EN FINCAS DEL INGENIO SANTA ANA

3.3.1 Definición del problema

El riego es una práctica cultural que requiere optimizar en lo posible la eficiencia de aplicación del agua (Montero, 2000). En la zona cañera de Guatemala, el agua es un recurso cada vez más escaso que obliga a manejarla con mayor eficiencia dentro de las condicionantes económicas que el riego conlleva. El Ingenio Santa Ana cuenta con una extensión de 25,934.02 ha, teniendo 94.24 % del área con sistema de riego, de ello 59.34 % es ocupado por aspersión, convirtiéndolo en el sistema de mayor uso dentro de las fincas administradas por el ingenio.

Una mala distribución del agua de riego dentro del área productiva implica la existencia de zonas con exceso y escases de agua, o bien la necesidad de aplicar en exceso para que las zonas que reciben menor cantidad de riego estén suficientemente abastecidas (Sevilla, 2007). Por ello es necesario monitorear la uniformidad de los riegos, cuyos resultados sirven a la administración de cada finca y región realizar las correcciones necesarias para mantener una buena uniformidad de riego y por ende una producción uniforme.

Durante la época seca, de la zafra 2015-2016, se realizaron evaluaciones de uniformidad de riego en las 7 regiones del ingenio, a través de lotes representativos de cada finca y en distintas etapas fenológicas del cultivo.

3.3.2 Objetivos

A. Objetivo General

Evaluar la uniformidad del sistema de riego por aspersión dentro de las fincas del Ingenio Santa Ana.

B. Objetivos Especificos

1. Determinar la lámina de agua aplicada por evento de riego en fincas del ingenio.
2. Determinar el Coeficiente de Uniformidad del sistema de riego por aspersión usado en el Ingenio Santa Ana

3. Determinar la Uniformidad de Distribución del agua dentro del área cubierta por evento de riego.


3.3.3 Metodología

A. Selección del punto de evaluación

Al final de la semana el Departamento de Ingeniería Agrícola recibe informes sobre el avance del riego y el plan de trabajo para la semana siguiente. En base a este informe se realizó una planificación semanal de las evaluaciones de riego a llevar a cabo, teniendo en cuenta la representatividad de los lotes y la ubicación de los aspersores en relación con la motobomba.


B. Recopilación de información

Para realizar la evaluación se procedió a recabar información técnica sobre el riego en el punto de evaluación como: marco de riego usado, distanciamiento entre aspersores y laterales, fecha de corte o siembra de la caña, fecha de último riego, tiempo de riego, tipo de aspersor, diámetro de boquilla, código de motobomba, etc. Para registrar la información se usó el formato que se muestra a continuación.



EVALUACIÓN DE UNIFORMIDAD DE RIEGO POR ASPERSIÓN

Departamento de Ingeniería Agrícola
Ingenio Santa Ana



DATOS GENERALES

Fecha: _____ Región: _____ Finca: _____
 Area (Ha): _____ Lote: _____ Código de Finca: _____
 Fecha de corte ó siembra: _____ Variedad: _____
 Dirección de surcos: _____ Código de motor: _____

DATOS DE CAMPO

DATOS DE ASPERSIÓN		DATOS DE BOMBA	
Fecha del último riego:		Numero de recipientes:	
Marco de riego:		RPM:	
Distancia entre aspersores (m):		Presión de Salida (PSI):	
Distancia entre laterales (m):		Horometro Inicial:	
Aspersor:		Horometro Final:	
Altura de Aspersor (m):		CAUDALIMETRO	
Diametro de boquilla (mm):		Caudal acumulado inicial:	
Diametro de pluviometro (cm):		Caudal acumulado final:	
PRESIÓN DE ASPERSORES		GPM Inicial:	
Presión inicial aspersor 1 (PSI):		GPM Final:	
Presión inicial aspersor 2 (PSI):		TUBERIAS (Diametro en Pulgadas)	
Presión final aspersor 1 (PSI):		Diametro tubería / Conducción:	
Presión final aspersor 2 (PSI):		No. Tubería / Conducción:	
RIEGO		Diametro tubería / Principal:	
Hora inicial:		No. Tubería / Principal:	
Hora Final:		Diametro tubería / Lateral:	
Tiempo de riego (hrs):		No. Tubería / Lateral:	

DATOS METEOROLÓGICOS

Tiempo (min)	15	30	45	60	75	90	105	120
Vel. Viento (Km/hora):								
Dirección:								

PLUVIOMETRIA

Fuente: Sistema de evaluación de uniformidad de riego Santa Ana, 2017

Figura 122. Formato de registro de campo de las pruebas de uniformidad en el sistema de riego por aspersión

C. Instalación de recipientes recolectores

Al finalizar la recopilación de información se posicionaron los recipientes para medir la pluviometría, teniendo cuidado que todos queden instalados antes de que se abriera la lleve de entrada de agua hacia los aspersores.



Figura 123. Instalación de recipientes recolectores en área donde se realiza prueba de uniformidad

La cantidad de recipientes a colocar dependió del marco de riego con que se trabajaba en el punto evaluado, manteniendo un área de 89 m² por pluviómetro, dejando un distanciamiento entre recipientes de 9 por 9 metros. Se instalaron pluviómetros en un lateral, entre los aspersores, tratando de formar un rectángulo con ancho equivalente al distanciamiento entre aspersores y largo del doble de distancia entre cada lateral de riego. Esto sirvió para simular la condición final del terreno, al final del riego, traslapando cada ala para formar un cuadrado con dimensiones iguales al marco de riego.

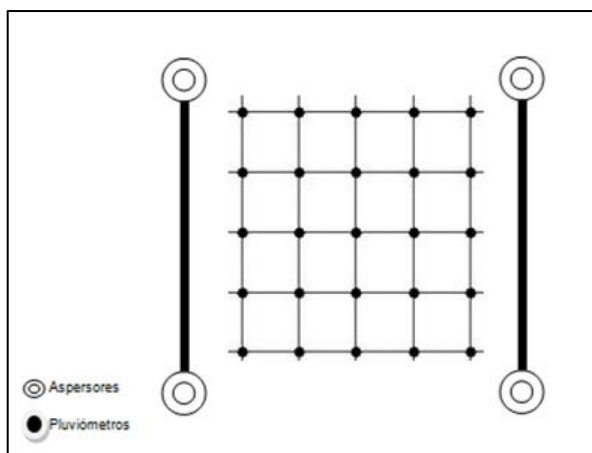


Figura 124. Condición final de posiciones de riego simulada en una prueba de uniformidad

Al finalizar la instalación de recipientes, se abrieron las llaves de los hidrantes de riego, registrando en el formato la hora de inicio del riego, midiendo durante el proceso la presión de funcionamiento de los aspersores, la velocidad y dirección del viento cada 15 minutos hasta finalizar el evento de riego.

D. Medición de pluviometría

Al finalizar el riego se midió el volumen de agua contenido en cada recipiente, usando para ello probetas, cada dato fue registrado en el formato de registro, al igual que la hora en que finalizó el riego.



Figura 125. Medición de volumen de agua interceptada por recipiente recolector

E. Coeficiente de uniformidad (C.U.)

En gabinete se calculó el coeficiente de uniformidad de riego, usando el modelo propuesto por Christiansen (1942), al igual que la uniformidad de distribución y la lámina promedio aplicada, y la lámina neta que se debió aplicar usando los criterios descritos en el marco teórico. El modelo propuesto por Christiansen (1942) se describe en la ecuación siguiente.

$$CU = 100 * \left[1 - \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - M|}{M * n} \right]$$

Donde:

X_i = Pluviometría del i-esimo recipiente

M= Pluviometría promedio de todos los recipientes

n= Número de pluviómetros instalados.

F. Uniformidad de distribución

La determinación de la Uniformidad de distribución se obtuvo de la media del 25 % de las pluviometrías menores, usando el modelo siguiente:

$$DU = 100 * \left(\frac{\text{Promedio del 25 \% de pluviometría menor}}{\text{Promedio general de pluviometría}} \right)$$

Al final del análisis se obtuvo la gráfica de distribución del agua en campo donde se observa la lámina requerida por el suelo, determinada a través de la evapotranspiración de referencia y el Kc del cultivo según su etapa fenológica, la lámina promedio regada, y la lámina de riego obtenida en cada pluviómetro ordenada de mayor a menor, con lo que se logra trazar el porcentaje del área regada con la lámina requerida, el porcentaje de área sobre regada y el porcentaje del área sub regada.

3.3.4 Evaluación

Durante la zafra 2015-2016, se llevaron a cabo 21 evaluaciones de uniformidad de riego en 6 regiones del Ingenio Santa Ana. A través de la información recopilada se determinó que la frecuencia de riego mayormente usada es de 15 días, con aspersores trabajando a una presión de 51 PSI, con un coeficiente de uniformidad de riego promedio de 71.7 %, una Uniformidad de Distribución de 59.7 % y una lámina promedio de 57.1 mm por evento de riego, trabajando con velocidades de viento de 5.6 km/h.

Cuadro 29. Resumen de resultados de pruebas de uniformidad realizadas durante la zafra 2015-2016

REGIÓN	Pruebas realizadas	RPM de Motobomba	Frecuencia de Riego	Presión de operación de aspersores	Coefficiente de Uniformidad	Uniformidad de Distribución	Lámina promedio (mm)	Lamina Requerida (mm)	Vel. De viento (Km/h)
1	1	1800	15	50	84.49	74.42	138.86	40.50	3.00
2	3	1667	15	58	71.12	62.46	40.47	41.40	4.00
3	3	1767	16	49	73.58	64.78	50.81	49.35	6.33
4	7	1757	16	50	65.59	49.03	55.30	50.10	6.84
5	2	1650	11	56	79.59	71.15	73.13	38.07	4.58
6	5	1575	15	50	73.93	62.50	50.79	45.84	5.26
TOTAL	21	1700	15	51	71.74	59.72	57.14	46.13	5.60

El coeficiente de uniformidad media de 71.7 % del sistema de riego por aspersión usado en el Ingenio Santa Ana es aceptable según los criterios establecido por Christiansen (1942), con rango de aceptación de 70 % a 80 % en las pruebas de coeficiente de uniformidad. Sin embargo, el valor más bajo se encontró en la finca La Giralda con 54.6 %, estableciéndose que la causa fue un marco de riego muy largo, de 63 metros, y regar cuando velocidades de viento de 10 km/hora; por ello se establecieron sugerencias de capacitación de personal y reducción de marcos de riego; el valor más alto de uniformidad de riego se encontró en la finca Portales, ubicada en la región 1, con 84.5 %, pudiendo observarse que el marco de riego usado era de 45 metros entre laterales y 36 metros entre aspersores, beneficiándose por las velocidades de viento con una media de 3 km/hora.

El valor de la Uniformidad de Distribución de 59.7 % es un valor bajo, comparado con el criterio de aceptación de 70 a 90 % para el sistema de riego por aspersión.

Cuadro 30. Resultados de pruebas de uniformidad de riego por aspersión realizadas durante la zafra 2015/2016 en el Ingenio Santa Ana

Fecha	Región	Código de Finca	Nombre de Finca	Lote	Código de motobomba	Tipo de Aspersor	Presión de operación de aspersor (PSI)	Marco de riego (m)	Frecuencia de Riego	RPM de Motobomba	Coefficiente de Uniformidad	Uniformidad de Distribución	Lamina promedio (mm)	Lamina de 25% menor (mm)	Vel. Viento (km/hr)
15/12/15	4	1339	Loma Linda	10	269-0002	Komet 101	51	54X54	15	2000	71.2	58.4	117.5	68.6	4.0
15/12/15	3	1422	Amazonas	27		Komet 101	40	45x45	15	2000	76.0	61.0	48.2	29.6	5.0
16/12/15	2	1124	Santa María	402	294-0129	Nelson F-150	50	63x54	15	1800	62.7	54.3	51.5	28.0	1.0
17/12/15	1	1309	Portales	3	294-0028	Nelson F-150	50	45x36	15	1800	84.5	74.4	138.9	103.3	3.0
18/12/15	6	1205	Agrícola del Sur	517	294-0180	Nelson F-200	62	63x63	15	1300	72.9	67.8	53.4	36.2	5.0
24/12/15	4	1130	Santa Clara	14	394-0025	Nelson F-100	54	54x54	13	1500	63.4	54.4	44.5	24.2	6.4
12/01/16	3	1440	Paso Antonio	301	307-0013	Komet 101	62	54x54	15	1700	76.0	72.2	55.0	39.7	9.0
19/01/16	5	1111	California	211	269-0050	Nelson F-150	55	45x54	12	1800	81.1	73.4	110.9	81.4	4.0
20/01/16	4	1129	Botón Blanco II	1	269-0003	Komet 101	60	54x54	14	1800	79.2	66.7	57.7	38.5	6.0
21/01/16	2	1426	Victorias-Masagua	104	269-0129	Komet 101	63	54x54	16	1400	73.2	69.1	42.5	29.4	4.0
22/01/16	6	1202	La peñita	206	294-0185	Nelson F-150	50	54x54	12	1600	73.7	64.0	58.8	37.6	7.0
26/01/16	6	1206	Ojo de Agua	610A	294-0185	Nelson F-150	40	45x45	15	1800	76.0	61.0	48.2	29.6	4.2
28/01/16	6	1205	Agrícola del Sur	521		Nelson F-150	40	54x54	22		72.4	62.1	61.2	38.0	4.0
2/02/16	3	1128	La Prosperidad	14	294-0022	Nelson F-150	45	54x54	18	1600	68.8	61.2	49.2	30.1	5.0
23/02/16	4	1340	Las victorias (Gomera)	101	394-0002	Nelson F-150	50	63x54	20	1700	57.7	26.6	33.0	9.0	3.0
8/03/16	2	1124	Santa María	205	294-0151	Komet 101	60	45x45	14	1800	77.4	64.0	27.4	17.6	7.0
18/03/16	5	1111	California	218	294-0092	Komet 101 y Nelson	57	54x54	10	1500	78.1	68.9	35.3	24.4	5.2
21/03/16	4	1344	La Giralda	210	294-0054	Nelson F-150	40	63x63	15	2000	54.6	29.0	47.5	13.8	10.0
29/03/16	4	1338	La Fronda	4		Nelson F-150	46	45x45	15	1800	63.0	50.1	46.9	23.5	11.5
14/04/16	6	1431	Cuncun	703	294-0013	Nelson F-150	58	63x72	9	1600	74.6	57.7	32.3	18.6	5.0
19/04/16	4	1339	Loma Linda	11C	394-0004	Nelson F-150	48	54x54	20	1500	70.0	58.0	40.1	23.0	7.0

3.3.5 Constancias



Figura 126. Ubicación de recipientes recolectores para realización de prueba de uniformidad



Figura 127. Medición de presión de salida de agua de aspersor Komet Twin 101 Plus



Figura 128. Anemómetro portátil para medición de velocidad de viento durante prueba



Figura 129. Medición de parámetros de operación de motor durante prueba



Figura 130. Hidrómetro utilizado para medición de flujo de agua



Figura 131. Medición de pluviometría registrada en cada recipiente recolector instalado

FORMATO DE EVALUACION DE UNIFORMIDAD		GESTIÓN DE LA CALIDAD	
LABOR RIEGO POR ASPERSIÓN		PROCESO AGRÍCOLA	
Fecha	19-12-16	Región	T
Finca	1309	Parcela	
Lote	3		
Ancho surco	1.50	Fecha corte	16-12-15
Variedad	Ca00202	Area Has	7.96
Código motor	294-0028	Dirección de surco	Este a Oeste

DATOS DE CAMPO	
Aspersor	5R-150 A2
Altura porta aspersor (m)	1.65
Diametro de boquilla	1.0
P. inicio (PSI) (asp 1)	50
P. final (PSI) (asp 1)	50
P. inicio (PSI) (asp 2)	50
P. final (PSI) (asp 2)	50
Diametro tubería/conduccion "	
N. de tubería / conduccion	
Diametro tubería principal "	6"
N. de tubería / principal	27
Diametro tubería lateral "	4"
N. de tubería / lateral	17

Datos Meteorológicos		Lecturas a cada 15 minutos							
Variables		15	30	45	60	75	90	105	120
Vel. Viento (m/s)	1.7	0.3	0.3	5.5	3.8		6.4	5.9	
Dirección del viento	S-N	S-N	S-N	S-W	S-E		S-E	S-W	

135	135	1540	1510	1960	3500	1970	1900	1335	775		
350	1800	1830	1655	1760	1670	1600	1940	1950	648		
555	1800	2000	1950	2024	2100	1730	2150	2280	235		
460	830	1950	2240	3150	2780	2450	2750	1340	585		

DE

Es

G-645928 Calmatina 00150

Figura 132. Resultados obtenidos de prueba de uniformidad



Figura 133. Lavado de recipientes recolectores después de ejecución de pruebas de uniformidad

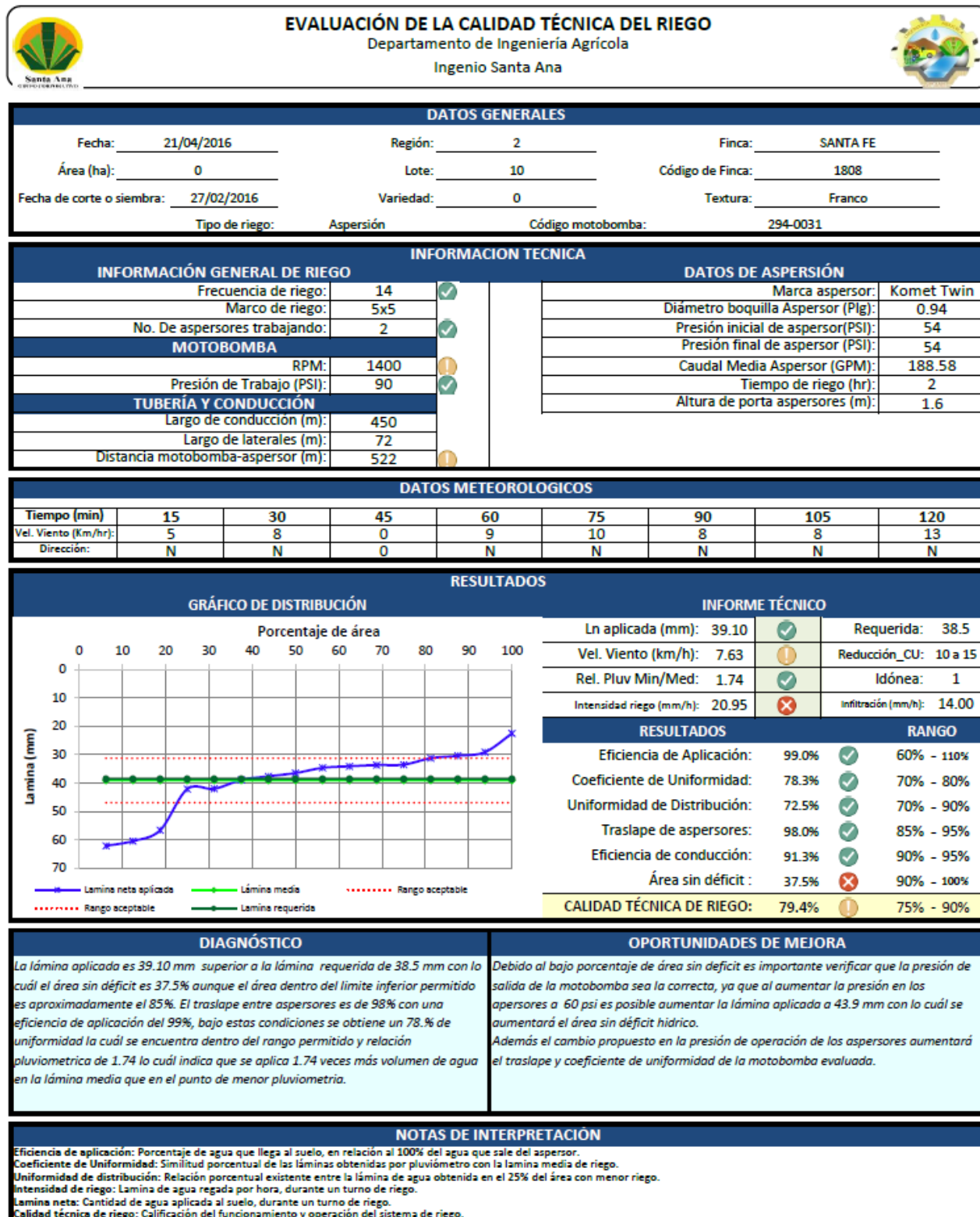


Figura 134. Informe de resultados de prueba de uniformidad realizada.

3.4 BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, M., & Finn, E. (1971). *Fundamentos cuánticos y estadísticos*. México: Fondo Educativo Interamericano.
- Castro, O. R. (2004). *Evaluación técnica y económica del riego por aspersión tipo cañon*. Guatemala: CENGICAÑA, Departamento de Riegos.
- Diestre, A. (2011). *Sondas de capacitancia FDR para monitoreo de humedad de suelo*. Obtenido de Red Agrícola: <http://www.redagricola.com/reportajes/riego/sondas-de-capacitancia-fdr-para-monitoreo-de-humedad-de-suelo>
- Montero, J. (2000). *Análisis de la distribución de agua en sistemas de riego por aspersión estacionario*. La Mancha: Universidad de Castilla.
- Sentek. (2003). *Manual de uso Diviner 2000*. Australia: Sentek.
- Universidad de Sevilla, España. (2007). *Open Course Ware Universidad de Sevilla*. Obtenido de Universidad de Sevilla, Open Course Ware: http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%209.%20Riego%20por%20asersion/page_18.htm
- Vásquez, E. (2017). *Constante dieléctrica del agua*. Recuperado el 03 de 28 de 2016, de UNAM: <http://laguna.fmedic.unam.mx/~evazquez/0403/constante%20dielectrica%20agua.html>
- Villaviciencio, A., & Villablanca, A. (2010). *Determinación del coeficiente de Uniformidad de Riego*. Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Investigación Especializado en Agricultura del Desierto y Altiplano.