

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES

EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO PIVOTE  
CENTRAL FIJO EN MANEJO CONVENCIONAL DE CAÑA DE AZÚCAR; RETALHULEU  
TESIS DE GRADO

**EDWIN ANACLETO MARCELINO BARRIOS DE LEON**  
CARNET 21664-10

COATEPEQUE, OCTUBRE DE 2018  
SEDE REGIONAL DE COATEPEQUE

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES

EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO PIVOTE  
CENTRAL FIJO EN MANEJO CONVENCIONAL DE CAÑA DE AZÚCAR; RETALHULEU  
TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE  
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

POR  
**EDWIN ANACLETO MARCELINO BARRIOS DE LEON**

PREVIO A CONFERÍRSELE  
EL TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES EN EL GRADO  
ACADÉMICO DE LICENCIADO

COATEPEQUE, OCTUBRE DE 2018  
SEDE REGIONAL DE COATEPEQUE

## **AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**

RECTOR: P. MARCO TULIO MARTINEZ SALAZAR, S. J.

VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO

VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS

SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

## **AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS**

DECANA: LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ

SECRETARIO: MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA

## **NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

LIC. OTTO RENÉ CASTRO LOARCA

## **TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN**

MGTR. RICARDO ARMANDO MORALES RAMÍREZ

ING. GUSTAVO ADOLFO MÉNDEZ GÓMEZ

ING. RUDY OSBERTO CABRERA CRUZ

Guatemala, 02 de Octubre 2018.

Honorable Consejo de  
La Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas  
Presente.

Distinguidos Miembros del Consejo:

Por este medio hago contar que he procedido a revisar el Informe Final de Tesis del estudiante Edwin Anacleto Marcelino Barrios de León, que se identifica con carné 21664-10, titulado: **“EVALUACION DE VELOCIDADES DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO PIVOTE CENTRAL FIJO EN MANEJO CONVENCIONAL DE CAÑA DE AZÚCAR; RETALHULEU”**, el cual considero que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad para ser aprobado, por lo que solicito sea revisado por la terna que designe el Honorable Consejo de la Facultad, previo a su autorización de impresión.

Atentamente,



Ing. Agr. Otto René Castro Loarca  
Código COL. 495

### Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante EDWIN ANACLETO MARCELINO BARRIOS DE LEON, Carnet 21664-10 en la carrera LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES, de la Sede de Coatepeque, que consta en el Acta No. 06168-2018 de fecha 1 de octubre de 2018, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO  
PIVOTE CENTRAL FIJO EN MANEJO CONVENCIONAL DE CAÑA DE AZÚCAR;  
RETALHULEU

Previo a conferírsele el título de INGENIERO AGRÓNOMO CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES en el grado académico de LICENCIADO.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, al día 1 del mes de octubre del año 2018.



LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ, DECANA  
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
Universidad Rafael Landívar

## ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	3
2.1 ANTECEDENTES .....	3
2.2.1 Riego .....	5
2.2.2 Pivote central fijo.....	5
2.2.3 Erosión hídrica en suelo desnudo.....	7
2.2.4 Lámina neta de riego.....	8
2.2.5 Velocidad de infiltración del agua en los suelos.....	10
2.2.6 Método del infiltrómetro de doble anillo .....	11
2.2.7 Escorrentía .....	12
2.2.8 Sistemas de riego por pivote central .....	13
2.2.9 Intensidad de aplicación del riego.....	15
2.2.10 Velocidad angular .....	17
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	19
3.2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO .....	20
4.1 GENERAL.....	21
4.2 ESPECÍFICOS.....	21
6.1 LOCALIZACIÓN DEL TRABAJO.....	22
6.2 MATERIAL EXPERIMENTAL.....	22
6.3. FACTOR ESTUDIADO.....	23
6.4 DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS .....	23
6.5 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	23
6.6 MODELO ESTADÍSTICO .....	24
6.7 UNIDAD EXPERIMENTAL.....	24
6.9. MANEJO DEL EXPERIMENTO .....	25
6.10 VARIABLES DE RESPUESTA .....	25

6.10.1 Prueba de velocidad de infiltración básica del suelo .....	25
6.10.2 Prueba de infiltración .....	26
6.10.3 Prueba de uniformidad.....	27
6.10.4 Intensidad de aplicación.....	28
6.10.5 Escorrentía .....	29
6.10.6 Erosión hídrica .....	30
6.10.7 Costo de energía y agua de las mediciones.....	31
6.11 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	31
6.11.1 Análisis estadístico.....	31
6.11.2 Análisis económico.....	31
7.1 INFILTRACIÓN BÁSICA DEL SUELO .....	32
7.2. UNIFORMIDAD DE RIEGO .....	35
7.3. INTENSIDAD DE APLICACIÓN (mm/h) .....	39
7.4. ESCORRENTÍA.....	42
7.6 ANÁLISIS ECONÓMICO .....	47
VIII. CONCLUSIONES.....	49
X. BIBLIOGRAFÍA.....	51

## INDICE DE CUADROS

CONTINIDO	PÁGINA
CUADRO 1. Valores de infiltración en mm/h, según texturas de suelo.	11
Cuadro 2. Tratamientos evaluados en el estudio de la determinación de la mejor velocidad del pivote central utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.	23
CUADRO 3. Datos de infiltración básica para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.	32

CUADRO 4: Resumen de datos de infiltración básica para cuatro velocidades del pivote central utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco Retalhuleu.	33
CUADRO 5: Análisis de Varianza para los datos de infiltración básica para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.	33
CUADRO 6: Promedio Ponderado de Infiltración Básica de suelo en finca Alaska Caballo Blanco, Retalhuleu.	34
CUADRO 7: Datos de Promedio Ponderado e Infiltración Básica de suelo en milímetros/hora, finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu	35
CUADRO 8 : Datos de los coeficientes de Uniformidad de aplicación de riego para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu	36
CUADRO 9: Resumen de datos de Uniformidad de riego, para los dos radios utilizados, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu	37
CUADRO 10: Análisis de Varianza para los datos de Uniformidad de aplicación de riego, en radio 1, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu	38
CUADRO 11: Prueba múltiple de promedios para los datos de Uniformidad de aplicación de riego, para radio 1, utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska Caballo Blanco, Retalhuleu	38
CUADRO 12: Análisis de Varianza para los datos de Uniformidad de aplicación de riego, en radio 2, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu	38
CUADRO 13: Prueba múltiple de promedios para los datos de Uniformidad de aplicación de riego, para el radio 2, utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu	39
CUADRO 14: Datos de Intensidad de aplicación del riego, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.	39
CUADRO 15: Análisis de Varianza para la Intensidad de aplicación del riego, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.	40



CUADRO 16: Prueba múltiple de promedios para los datos de Intensidad de aplicación de riego, utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu 40

CUADRO 17: Datos de velocidad de operación (m/h), intensidad de aplicación (mm/h) y promedio ponderado infiltración básica del suelo (mm/h), finca Alaska Caballo Blanco, Retalhuleu. 41

CUADRO 18: Datos de velocidad de operación (m/h), intensidad de aplicación (mm/h), promedio ponderado infiltración básica del suelo (mm/h) y escorrentía total (m<sup>3</sup>) finca Alaska Caballo Blanco, Retalhuleu 42

CUADRO 19: Cuadro resumen de área por tratamiento, número de riegos aplicados, lámina de agua aplicada, intensidad de aplicación, metros cúbicos por hectárea metros cúbicos por temporada de riego y la Escorrentía producida en metros cúbicos en el área irrigada, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu. 43

CUADRO 20: Cuadro resumen de Escorrentía producida en el área irrigada, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu. 43

CUADRO 21: Análisis de Varianza para Escorrentía producida en el área irrigada, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu. 44

CUADRO 22: Análisis Post Andeva para la Escorrentía producida en el área irrigada, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu. 45

CUADRO 23: Datos de velocidad de operación (m/h), intensidad de aplicación (mm/h), promedio ponderado infiltración básica del suelo (mm/h), escorrentía total (m<sup>3</sup>) y tasa de erosión total, finca Alaska Caballo Blanco, Retalhuleu 45

CUADRO 24: Datos de Erosión hídrica producida en el área irrigada, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu. 46

CUADRO 25: Análisis de Varianza, para la Erosión hídrica producida en el área irrigada, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu. 47

CUADRO 26: Datos de milímetros aplicados, promedio infiltración básica y milímetros excedidos para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu 47

CUADRO 27: Datos de costos de riegos/ha, área total pivote, numero de riegos, costo total de riegos, perdida en quetzales y por ha para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu 48

CUADRO 28: Datos de mm aplicados/hora, mm excedidos, frecuencia de riego por tratamiento, mm aplicados/día, mm reales utilizados y mm reales aplicados/día, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu 48

## INDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	PAGINA
Figura 1: Características de de la infiltración e infiltración acumulada de los suelo	10
Figura 2: Croquis de campo donde se desarrolló la evaluación del pivote central fijo.	25
Figura 3: Esquema de una parcela de escurrimiento	29
Figura 4: Esquema de una parcela de escurrimiento para erosión	31
Figura 5: Intensidad de aplicación Vrs Infiltración Básica del suelo, finca Alaska, Caballo Blanco Retalhuleu.	41
Figura 6. Mapa ubicación de la evaluación	54
Figura 7. Generador, base y computadora de pivote.	55
Figura 8. Estructura de pivote central fijo	55
Figura 9. Método doble cilindro para medición de infiltración básica del suelo	56
Figura 10. Medición infiltración básica del suelo	56
Figura 11. Medición uniformidad de aplicación de riego	57
Figura 12. Medición intensidad de aplicación	57
	58

Figura 13. Visualización intensidad de aplicación	
Figura 14: Ubicación parcelas de esorrentía y erosión en finca Alaska	58
Figura 15. Parcela de esorrentía	59
Figura 16. Colectores de agua esorrentía	59
Figura 17. Evento de riego en parcelas de esorrentía y erosión	60
Figura. 18 Colectores de agua de esorrentía y erosión	60
Figura. 19. Medición del agua de esorrentía y extracción de muestra para calcular la erosión.	61
Figura. 20. Proceso para cálculo de la erosión del suelo	61
Figura. 21. Secado del suelo para cálculo de la erosión	62
Figura 22. Análisis físico de área evaluada finca Alaska	62
Figura 23. Relación % de arcilla e infiltración básica. Fuente.	63

## RESUMEN

El presente estudio consistió en la evaluación de velocidades de funcionamiento del sistema de riego pivote central fijo, en manejo convencional de Caña de Azúcar; Retalhuleu. Las velocidades comparadas fueron 15 %, 25 %, 35 % y 45 %, 27.95, que equivalen a 27.95, 46.60, 65.20 y 83.85 m/hora; para lo cual se midieron las siguientes variables y su respectivo análisis económico.

Infiltración básica del suelo, Uniformidad de riego, Intensidad de aplicación del riego, Escorrentía y Erosión del suelo.

Para los datos generados en cada variable se realizó un análisis de varianza mediante el diseño experimental de bloques completos al azar, con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones, con una confiabilidad estadística del 95 %.

La infiltración básica del suelo osciló entre 5.4 a 27.3 mm/hora, con un promedio ponderado de 12.54 mm/hora, con respecto a la uniformidad de riego los resultados fueron entre 83.93 y 87.90 %, considerándose como aceptable uniformidades entre 82 y 88 %. Para la intensidad de aplicación, se midió como la menor 10.68 mm/hora; y la relación determinada fue que a mayor velocidad del pivote, menor intensidad de riego, por ende menor escorrentía y erosión.

El análisis económico consistió en cuantificar el total de milímetros (mm) de agua aplicados y los mm de agua excedidos por tratamiento, dando como resultado que en la velocidad donde menos se pierde el recurso es la de 45 %, por lo tanto es la que genera economía a la empresa.

## I. INTRODUCCIÓN

En Guatemala operan actualmente 11 Ingenios, ubicados en 4 departamentos de la costa del pacífico, en la zafra 2015-2016 estos cultivaron 270 mil ha del cultivo de caña de azúcar, en las cuales produjeron 27 millones de toneladas métricas de caña molida, (ASAZGUA 2014), y se ubica en el segundo lugar de países latinoamericanos productores después de Brasil; dicho volumen de producción se obtiene con el procesamiento de alrededor de 15.5 millones de toneladas métricas de caña de azúcar producidas en un área total de 180,000 hectáreas de cultivo. La producción total de azúcar se destina en un 64% a la venta en el mercado mundial, un 31% para consumo interno y el restante 5% para abastecer el mercado de Estados Unidos. En el mercado mundial participan fuertemente otros países productores de azúcar a nivel mundial siendo los diez más importantes: Brasil, India, China, Tailandia, Pakistán, México, Colombia, Filipinas, Australia, Indonesia, Estados Unidos, Guatemala, Argentina. (Portal de estadística 2014).

El cultivo de caña de azúcar en Guatemala ha tomado en los últimos años un papel preponderante en la agroindustria del país, ocupando aproximadamente un 2.15% del área total del territorio nacional (ASAZGUA 2014); ayudando al sector agrícola a posicionarse como el segundo sector generador de divisas en Guatemala; ubicando al país como el quinto exportador de azúcar en el mundo, segundo en Latinoamérica y tercer lugar en productividad a nivel mundial, toneladas métricas/hectárea. (CENGICANÑA 2010).

Para el óptimo desarrollo y productividad del cultivo de la caña de azúcar, existen diferentes requerimientos que se pueden mencionar; en cuanto a suelo es un cultivo poco exigente, pero las diferentes características físicas y químicas forman una parte importante en lo referente al manejo del mismo; la cantidad y calidad de los aportes de agua son vitales en el ciclo del cultivo.

Para seleccionar los sistemas de riego es muy importante utilizar los parámetros, eficiencia en el uso del agua, economía en la inversión y manejo del sistema de riego; en tal sentido, los sistemas han tenido que evolucionar para tratar de estar lo más cerca posible de dichos parámetros. Esa evolución ha llevado a la innovación de métodos más eficaces para cubrir los requerimientos del cultivo; que puedan dar un manejo óptimo de la irrigación con mayor calidad de riego en cuanto a cantidad de agua para su uso óptimo y bajo costo. Uno de los sistemas que en la actualidad se

emplea en Guatemala y optimiza de una mejor manera los recursos es el método de riego con Pivote central fijo, el cual es un tipo de dispositivo móvil de riego por aspersión y su mayor diferenciación es que riegan superficies de grandes dimensiones de forma circular. (King & Bjorneberg. 2007).

En la presente investigación se plantea una evaluación de irrigación en el cultivo de caña de azúcar (Saccharum officinarum) por medio del sistema de pivote central fijo, utilizando cuatro diferentes velocidades de funcionamiento expresado en metros/hora. Se midieron diferentes variables que permitieron determinar qué velocidad de operación es la óptima para las condiciones de finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu. En la actualidad se opera este sistema a una velocidad de 46.60 m/h, observando pérdida de agua por escorrentía y pérdida de la capa superficial del suelo por erosión, es necesario considerar la importancia de la velocidad de riego para determinar el coeficiente de uniformidad, optimización de energía, costos y escorrentía. (CENGICAÑA 2010)

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 ANTECEDENTES

Castro (2010) Señala que el riego en la zona cañera de Guatemala es una actividad muy importante, se desarrolla junto con la zafra en el período seco, del quince de noviembre al quince de mayo. La actividad del riego se incrementa en la dirección al mar, debido al aumento del déficit hídrico y a las condiciones climáticas de las zonas de vida. El despegue de la actividad del riego en la zona cañera guatemalteca empezó en el año 2000, en ese entonces el área de riego era del 61%, pero en la zafra 2009/2010, llegó a ocupar el 80% en relación con el área total administrada. La labor del riego tiene como objetivos: Asegurar la población inicial de la caña de azúcar e incrementar el peso de los tallos, para tal fin, se realizan riegos pos corte o siembra y pre corte para cada una de las etapas fenológicas tipificadas por sus necesidades hídricas.

Para seleccionar sistemas de riego se consideran los parámetros: Eficiencia en el uso del agua y economía en la inversión y manejo del sistema de riego, los cuales han permitido optimizar el uso del agua derivada de la diversidad de fuentes como: ríos, norias, pozos profundos, pozos artesanales y aguas servidas de origen industrial.

A partir de 1998 empezaron a surgir nuevas alternativas tecnológicas. Apareció el uso de surcos para regar, con variantes de regar todos los surcos o solo surcos alternos; así también el uso de sistemas de bombeo para derivar agua de la fuente, conducirla por gravedad y regar por aspersión tipo cañón (CENGICAÑA 2010).

El crecimiento de la actividad del riego en el período 1990/91 al 1998/99 solo alcanzó un índice de crecimiento de 0.89. Ya en el periodo 2001/02 al 2008/09 el índice de crecimiento del riego fue de dos veces más de área. En el periodo 2009-2010 el área física que se regaba era de 146,347 hectáreas, que representa cinco veces más de lo que se regaba en el período de zafra 1990/91 y 2.58 veces en relación con período de zafra 2001/02, (CENGICAÑA 2010).

La caña de azúcar es un cultivo poco exigente en cuanto a suelos, tolera bien y se ha cultivado económicamente tanto en suelos muy pesados o arcillosos, como en muy ligeros o arenosos. Sus exigencias respecto a suelos se limitan a una profundidad necesaria para desarrollar su sistema radicular, alrededor de un metro; aireación suficiente, por lo que deben evitarse los problemas de drenaje tanto interno como superficial; pH, valores que no se alejen demasiado de la neutralidad,

aunque suele tolerar desde 4 hasta 10; salinidad y/o alcalinidad, no muy elevada, aun cuando hay diferencias bastantes marcadas entre variedades.

Lo más importante en relación al suelo cañero, es su manejo; el cual debe adecuarse a las condiciones requeridas por el cultivo y a las características físicas químicas y biológicas que cada suelo presenta, y que lo hacen un complejo activo, al cual hay que considerar más como material viviente que como materia inerte. Ese manejo, en consecuencia, debe orientarse básicamente hacia el logro de cambios favorables al desarrollo y productividad del cultivo y a la conservación y posible mejora de las propiedades del suelo mediante: (CENGICAÑA 2010).

- Conservación y posible mejora de su estructura.
- Conservación y posible mejora de su fertilidad y contenido de materia orgánica.
- Evitar los procesos de degradación del suelo erosión, salinidad y de alcalinidad. FONAIAP (1986).

Según (King & Bjorneberg, 2007). El riego con pivote central es una opción muy conocida para muchos productores, debido a su eficiencia de regar grandes áreas, la facilidad de uso y grado de automatización.

En Cuba se ha incrementado la utilización de las máquinas de pivote central en los cultivos más exigentes a un adecuado manejo de agua, por ejemplo en el cultivo de caña de azúcar, el 45 % de las áreas (alrededor de 370,001.25 hectáreas) cultivadas en la campaña 2003-2004 fueron regadas con estos sistemas.

(Rodés y Alemán, 2005). Señalan que los pivotes de accionamiento hidráulico en los últimos años se han

ido reemplazando por eléctricos en un proyecto nacional por electrificar los sistemas de riego e incrementar el ahorro de combustible y mejorar la eficiencia de aplicación del agua.

Tarjuelo (2005). Determinó que los pivotes eléctricos son más utilizados porque permiten la fácil regulación de la velocidad en el sentido de avance o retroceso y de desplazar la máquina en seco sin necesidad de regar.



Uribe et al (2001) propone que el alto grado de mecanización, generado por el avance tecnológico de los pivotes centrales en el último tiempo, ha determinado desarrollar procedimientos que controlen el funcionamiento total del equipo en forma completa desde un panel central de control o a través de acceso a distancia.

## **2.2. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.2.1 Riego**

Es el suministro adicional del agua al perfil del suelo, de forma artificial, para su utilización en los cultivos en el momento oportuno y en las cantidades necesarias para la obtención de una producción sostenible.

Consiste en aplicar, en forma intermitente, el agua que el cultivo consume en forma continua, pero con el máximo ahorro en agua, energía y mano de obra, y con la mejor uniformidad posible, dentro de los parámetros económicos aplicables, en forma gráfica es así: Capacidad de campo, Déficit permitido de manejo y Punto de marchitez.

### **2.2.2 Pivote central fijo**

Consiste en un sistema con ramal de riego con un extremo fijo, por el que recibe el agua y la energía eléctrica y otro móvil que describe un círculo girando sobre el primero, se caracterizan porque se mueve mientras riega; está formado por una tubería porta-emisores que va sustentada sobre torres automotrices. Tiene aproximadamente once torres. La pluviometría es variable en cada una de las torres. La movilidad del ramal puede también ser hidráulica. La eficiencia del agua a nivel de parcela debe estar entre 85 y 90 por ciento. González, P (2007).

Keller and Bliesner (1990) y Uribe et al (2001) citan que las principales ventajas del equipo, vienen dadas del sistema de riego por aspersión, que se complementan, con las características propias del sistema con pivote central:

- Debido a que la dosis de riego es únicamente función de la velocidad de desplazamiento de la máquina, puede adaptarse tanto a dosis grandes como pequeñas.

- La modificación de la pluviometría permite al sistema adaptarse a distintos tipos de suelos. Después de completar un riego el sistema queda en posición para comenzar el próximo riego.
- El sistema permite realizar riegos de alta uniformidad. No necesita nivelaciones, adaptándose a topografías onduladas. Esto permite conservar la fertilidad natural del suelo.
- Se simplifica la entrega de agua al usar el pivote como un punto estacionario.
- Evita la construcción de acequias y canales, aumentando la superficie útil.
- Puede conseguir altos grados de automatización, con el consiguiente ahorro de mano de obra.
- El funcionamiento y la alineación son controlados desde un punto fijo en el pivote. Posee un bajo costo de operación por hectárea.
- El sistema trabaja a bajas presiones permitiendo menores requerimientos de energía.
- Permite una rotación de cultivos, con la condición de que el dimensionamiento se realice para el cultivo más exigente.
- Permite la aplicación de químicos junto con el agua de riego.

Uribe et al (2001) y otros autores como Allen et al, (2000) destacan las siguientes desventajas presentadas por los sistemas de riego con pivote central:

- Alta inversión inicial.
- Requiere de un servicio técnico especializado.
- Se necesita adaptar la infraestructura para su funcionamiento (mover cercos, realizar nuevos trazados de líneas eléctricas, eliminar árboles, modificar caminos, otros).
- Dejan un 20 % del área fuera del círculo sin riego, a menos que se utilicen equipos para regar las esquinas que resultan muy costosos y complejos.

- Para un buen manejo del riego y la presencia de varios cultivos bajo el pivote, el sistema obliga a cultivar en sectores circulares.
- La uniformidad de riego se ve afectada por la influencia de fuertes vientos.
- Requiere de sistemas de decantación y filtraje cuando se presentan problemas con la calidad del agua.
- La presión de operación del lateral se puede modificar significativamente con la pendiente del terreno, lo cual da lugar a variaciones en la descarga a menos que se usen reguladores de presión.

### **2.2.3 Erosión hídrica en suelo desnudo**

La erosión hídrica es uno de los procesos de degradación más importantes, que afectan la capacidad de las tierras en pendiente, para la producción de alimentos para el consumo humano o animal; además, la presencia de las plantas y las primeras capas del suelo son imprescindibles para que el agua de las precipitaciones se infiltre, por lo que el aumento en la erosión significa siempre una disminución en la recarga de los acuíferos. Esta erosión hídrica, es un proceso erosivo típico de regiones tropicales, causado por la agresividad de la lluvia, debido a las características de intensidad, duración y frecuencia asociadas a los eventos pluviométricos Núñez Solís (2001).

La lluvia y el escurrimiento superficial, son los agentes responsables del desprendimiento y movimiento de las partículas de suelo sobre la superficie terrestre. El riesgo de erosión por acción del agua es máximo en periodos de lluvias intensas, en que el suelo se encuentra saturado, con escasa cubierta vegetal, por lo que aumenta el movimiento del agua por la superficie del suelo. El efecto de la escorrentía resultante, elimina cantidades importantes de suelo. La erosión hídrica es casi siempre debida a la disminución de la cubierta vegetal del suelo. (Rivera Trejo et al 2005) La erosión provoca un aumento de la carga sólida que arrastran los ríos, disminuyendo sustancialmente la capacidad útil de algunos aprovechamientos hidráulicos. Asimismo, la carga sólida de los ríos, enturbian las aguas costeras de las zonas donde desembocan.

La erosión se produce por dos mecanismos. El primero es por el impacto directo de la gota de lluvia sobre la superficie del suelo, que produce la destrucción de los agregados o terrones del

suelo cuando éste está desnudo, el material fino separado tapa los poros del suelo y entonces el agua empieza a escurrir por la superficie; es decir, que al separarse en sus componentes elementales, el suelo queda impermeabilizado; por un lado se torna imposible que el agua se infiltre para alimentar a las plantas, mientras que por otro lado, el suelo se sigue deslavando (Rivera Trejo et al 2005). El segundo mecanismo, es cuando el agua escurre sobre la superficie del suelo, debido a la pendiente y arrastra partículas del mismo, materia orgánica y nutriente, como el nitrógeno y el fósforo, entre otros (Escalante 2005).

De acuerdo con la intensidad de lluvia, tipo de suelo y grado de protección de la superficie se producirá erosión hídrica de distinta gravedad. Así se encontrará erosión laminar, donde el suelo se pierde en capas muy delgadas. Luego puede aparecer la erosión digital, en forma de los dedos de una mano, donde el agua que escurre desde las lomas más altas a los bajos es capaz de cortar el suelo y formar pequeños surcos de menos de 5 a 10 cm de profundidad. Por último, la forma más grave de erosión lo constituye la formación de surcos y canales profundos, llamados cárcavas. Estas cárcavas pueden tener varios metros de ancho y de profundidad, constituyendo pequeños arroyos (Escalante (2005).

#### **2.2.4 Lámina neta de riego**

Daza M, OH. (1986) establece que la lámina neta de agua es la cantidad de agua que debe ser aplicada durante el riego con el fin de cubrir el agua que se ha agotado en el suelo hasta su punto de marchitez permanente o la cantidad aplicada de acuerdo al umbral de riego establecido.

Para calcular la lámina neta de aplicación de agua, se requiere conocer los siguientes datos:

- La humedad disponible del suelo. ( $CC - PMP$ )
- El agotamiento de la humedad disponible del suelo.
- La profundidad radical efectiva del cultivo.

Se deben realizar ciertas pruebas para determinar la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente del suelo. En ausencia del equipo y el tiempo para realizar estas pruebas, es posible utilizar estudios previos para el cultivo y tipo de suelo, preferiblemente realizados en la misma zona, siempre y cuando se conozca la textura del suelo. Sin embargo los datos publicados sobre humedad disponible de diferentes tipos de suelo, no siempre coinciden. En la siguiente tabla se presentan los datos de dos fuentes diferentes.

La diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente nos da la humedad disponible del suelo (o capacidad de retención de agua), la cual es la cantidad total de agua que el cultivo utiliza.

Dependiendo que tan sensible sea el cultivo a condiciones difíciles, es posible permitir cierto agotamiento de la humedad total del suelo, claro de manera parcial. Para la mayoría de los cultivos, un agotamiento del 50% de la humedad disponible se considera aceptable, esta es la humedad que siempre estará fácilmente disponible para el cultivo sin causar un sobre esfuerzo indebido.

La profundidad radical efectiva puede ser obtenida de la experiencia bajo condiciones climáticas y de riego similares, o de la literatura. Las siguientes tablas nos muestran los datos de las profundidades radicales máximas. Es recomendable, sin embargo, usar datos locales siempre que estos estén disponibles, ya que estos serían más realistas. La lámina neta máxima de agua que se aplica en el riego se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$L_n = \left[ \frac{(\%CC - PMP)}{100} \right] (Dap) (Z_r) (UR)(10)$$

Dónde:

**L<sub>n</sub>** = La lámina neta por riego en mm.

**CC**= Humedad del suelo a capacidad de campo en %.

**PMP**= Humedad del suelo a punto de marchitez permanente en %

**Z<sub>r</sub>**= Profundidad del suelo que las raíces explotan de manera efectiva. (cm)

**UR**= Lámina permitida de manejo.

Para la caña de azúcar, según Doorenbos y Kassam, 1988, establece una profundidad radicular que va desde 1.2 a 2.0 m.

### 2.2.5 Velocidad de infiltración del agua en los suelos

Según Daza M, OH. (1986) la velocidad de infiltración es la capacidad del suelo de absorber el agua. La velocidad de infiltración puede definirse como la capacidad de admisión de agua de un terreno desde la superficie al interior del mismo. En otros términos, es la relación entre la lámina de agua infiltrada y el tiempo que tarda en infiltrarse esa lámina. Comúnmente suele expresarse en cm/h o mm/min, ver figura 1.

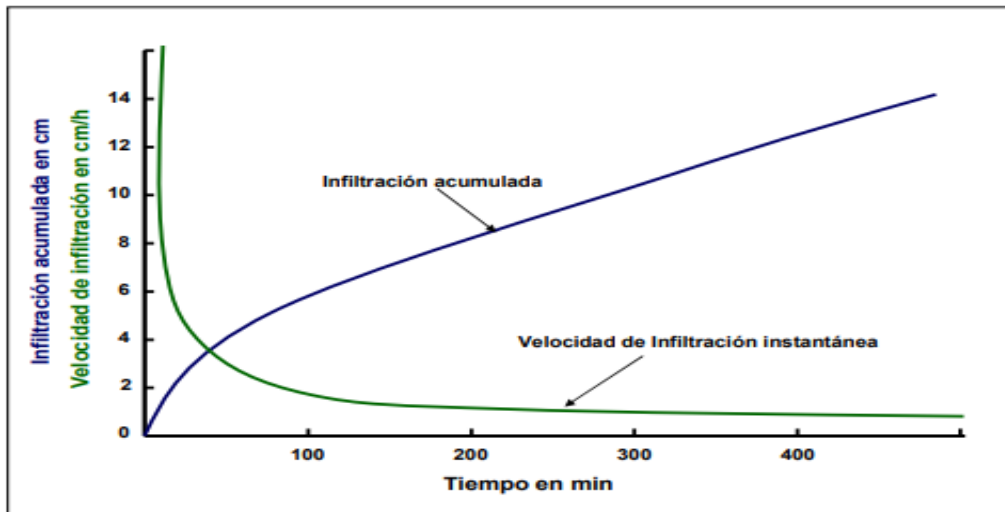


Figura 1: Características de la infiltración e infiltración acumulada de los suelos. Fuente. Autor.

De acuerdo a la textura se consideran los siguientes parámetros.

CUADRO 1. Valores de infiltración en mm/h, según texturas de suelo.

TEXTURA	INFILTRACIÓN
Muy arenoso	20-25 mm/h
Arenoso	15-20 mm/h
Limo-arenoso	10-15 mm/h
Limo-arcilloso	8-10 mm/h
Arcilloso	<8 mm/h
Arenoso franco	60 – 175 mm/h
Franco arenoso	20 -75 mm/h

La velocidad de infiltración no es uniforme, tiende a disminuir mientras transcurre el tiempo desde que comienza la aplicación de agua en el suelo cuando ésta es continua. Si se grafican las velocidades registradas en función del tiempo transcurrido, se obtendrá una curva que puede ser adecuadamente descrita mediante el modelo potencial. (Fernández, et al., 1971)

### 2.2.6 Método del infiltrómetro de doble anillo

Daza M, OH. (1986) se basa en la medición de una lámina de agua que se infiltra en un tiempo determinado. La medición de dicha lámina se hace en uno de los anillos que posee una escala (o midiendo láminas incorporadas). “Tanto en este método como en el de surcos de ensayo es necesario contar, en el suelo, con un contenido de humedad tal que sea similar al Umbral de Riego que se determinó previamente”. Los anillos están estandarizados (para riego) en diámetro y alto. El externo es de 50 cm y el interno de 30 cm. La altura de ambos es de 30 cm. Los dos deben ser introducidos en el suelo unos 10 cm aproximadamente. El uso del cilindro exterior tiene la finalidad de actuar como 30 cm, o sea amortiguar el efecto producido por el agua del cilindro interior en contacto con el suelo seco, obteniéndose así una infiltración cuasi vertical. Ambos cilindros se llenan con una altura de agua similar a la calculada para la dosis de riego

(lámina de riego). Manteniéndose esa carga prácticamente constante volviendo a rellenar cuando se produzca una 50 cm disminución de aproximadamente 20 mm (minimizar los efectos de la variación de la carga de agua en el valor de infiltración).

### **2.2.7 Escorrentía**

Representa la cantidad de agua de lluvia o de riego que cae sobre la superficie del suelo pero que éste no puede infiltrar. Así, el agua sobrante escurre sobre él sin ser aprovechada por el cultivo. La escorrentía puede ser grande en algunos sistemas de riego por superficie (principalmente riego por surcos), sin embargo no suele ser frecuente que se produzca en riegos por aspersión bien diseñados y manejados. Por lo general, en riego localizado no se produce escorrentía.

La relación de escorrentía es la cantidad de agua que escurre sobre la superficie del suelo regado dividida entre el total de agua aplicada con el riego. Por ejemplo, si en un riego se aportan 1000 metros cúbicos de agua y se pierden 200 por escorrentía, la relación de escorrentía será 0.2 o del 20%.

Relación de escorrentía = cantidad perdida por escorrentía / cantidad de agua aplicada.  
(AgroEs.es)

#### **2.2.7.1 Parámetros que influyen en la escorrentía**

Los principales parámetros que afectan la escorrentía son:

- La intensidad de la precipitación;
- La capacidad de infiltración de una superficie particular;
- La condición hidráulica a la que se encuentra el suelo o subsuelo y,
- Las características hidráulica del suelo o subsuelo.

La comparación entre estas variables permite obtener información sobre los procesos que se pueden presentar bajo diferentes situaciones. Las condiciones en las que se encuentra el suelo en el momento en que se produce la precipitación afectarán de forma sustancial el escurrimiento o escorrentía. Se pueden distinguir los siguientes casos: Si la intensidad de la precipitación es menor que la capacidad de infiltración y el contenido de humedad del suelo es menor a su capacidad de campo, el escurrimiento sobre la superficie del terreno será reducido, ya que el suelo será capaz de captar una parte importante del volumen de agua que precipita sobre este. El flujo subsuperficial será muy reducido, ya que el agua captada es retenida por la capilaridad y aumentará el contenido de humedad inicial en el suelo.



Cuando la intensidad de la precipitación es menor que la capacidad de infiltración y el contenido de humedad del suelo está próxima o igual a la capacidad de campo, parte de la precipitación se convertirá eventualmente en escurrimiento sobre el terreno; sin embargo, los volúmenes seguirán siendo de poca cuantía. El flujo sub-superficial será importante. Se puede notar que esta segunda situación frecuentemente se deriva de la primera, cuando la precipitación dura un cierto período de tiempo ininterrumpidamente.

Si la intensidad de la precipitación es mayor que la capacidad de infiltración y el contenido de humedad del suelo es menor a su capacidad de campo. El suelo, presentando una deficiencia de humedad importante, permitirá que el agua que precipite, a pesar de que la capacidad de infiltración es reducida, se utilice, parcialmente en abastecer de humedad al suelo, escurriendo sólo una porción relativamente pequeña.

Finalmente, cuando la intensidad de la precipitación es mayor que la capacidad de infiltración y el contenido de humedad del suelo es mayor o igual a su capacidad de campo. En este caso, al encontrarse el suelo la condición cercana a la saturación, no permitirá una infiltración importante, de modo que la mayor parte del agua precipitada se convertirá en escurrimiento sobre el terreno. El flujo sub superficial también será importante. Cuando la parte somera de un suelo no permite una infiltración importante, la saturación en un suelo tendrá lugar sólo en una porción cercana a la superficie, siendo incapaz el frente de humedad de avanzar a mayor profundidad, favoreciendo de esta manera al escurrimiento sobre el terreno.

### **2.2.8 Sistemas de riego por pivote central**

Este sistema de riego consiste en llevar el agua hasta los cultivos mediante una tubería metálica, generalmente de acero galvanizado o aluminio, la que es montada sobre torres de metal que se mueven sobre conjuntos de ruedas, de modo que el pivote gira en círculos manteniendo uno de sus extremos fijos en el centro del campo. A todo lo largo de la tubería cuelgan aspersores, distribuidos de acuerdo a los requerimientos, cuyas cabezas de riego pueden ser ubicadas a distancias variables del suelo. Barnéond A, JF. (2011)

La gran mayoría de los sistemas actuales son accionados por motores eléctricos conectados a cajas de cambios en las ruedas de las torres. Otros, son hidráulicos. Además, en la actualidad, casi todas estas máquinas se mueven sobre ruedas de goma de diversos diámetros y anchos de neumático, las que por lo general se seleccionan procurando minimizar la profundidad de las huellas en el campo. La profundidad de las huellas dependerá del tipo de suelo, de cuánta agua se le aplique entre otras condiciones de campo y del peso del pivote. Barnéond A. JF. (2011)

La tecnología actual permite a los operadores mover los pivotes en cualquier dirección, en el sentido de las agujas del reloj o al contrario, con o sin aplicación de agua en tanto se mueven. Esto permite operar los pivotes con patrones como los del limpia parabrisas de un automóvil, de modo de alternar dentro del círculo entre dos diferentes cultivos con distintos requerimientos de agua y tiempos de riego. Barnéond A, JF. (2011)

El patrón de riego en círculo de los pivotes centrales muchas veces no coincide con la forma de la mayoría de los predios agrícolas. En un principio esta particularidad no era importante ya que muchos pivotes fueron instalados para regar terrenos de bajo valor, por ejemplo en suelos arenosos, de modo que las esquinas que no recibían agua (improductivas) no preocupaban mayormente a los agricultores. Las áreas entre el círculo de riego y las esquinas de los terrenos generalmente cuadrados o rectangulares donde se instalaban los pivotes eran utilizadas para cultivos de temporada. Pero pasa a ser un verdadero problema cuando se cultiva en terrenos de alto valor. Barnéond A, JF. (2011).

Los fabricantes de pivotes primero intentaron agregando cañones (aspersores también llamados pitones o pistones) de alto caudal en los extremos de los pivotes, los que se activaban automáticamente cuando el extremo móvil llegaba a la esquina. Esta fue una solución parcial ya que no se moja toda el área de la esquina y además se sufre la deriva por viento.

En 1974 se introdujo el sistema de “esquinero”, el que consistió en una extensión del pivote central de hasta 80 m, la que cuenta con una torre móvil propia y control. El esquinero se despliega y repliega desde el extremo móvil del pivote activándose automáticamente en las

esquinas. Barnéond A, JF. (2011). Los tipos básicos de pivote central fijo y pivote central móvil son:

### **2.2.8.1 Pivote fijo o central**

Es un sistema de riego móvil, con un lateral que rota alrededor de un punto fijo o pivote. En este punto fijo se ubica la toma de agua, la que generalmente es bombeada desde una estructura de acumulación ubicada fuera del perímetro de riego. Barnéond A, JF. (2011).

### **2.2.8.2 Pivote móvil o frontal**

Es generalmente de menor tamaño que los fijos. Cuando termina un circuito de riego se modifica manualmente la dirección de las ruedas y luego son tirados por un tractor, desde uno de sus extremos, hasta el siguiente circuito de riego. Se requiere de un alimentador de agua (hidrante) en el centro de cada uno de los circuitos de riego (mucho más tubería enterrada). Estos sistemas son mucho más demandantes de mano de obra que los fijos. Barnéond A, JF. (2011)

Las principales características son:

- Desplazamiento rápido de un área de cultivo a otra.
- Dispositivos de acoplamiento al tractor simples y de fácil manipulación.
- Capacidad de irrigación de hasta 100 hectáreas.
- Accionamiento por generador o red eléctrica.
- Torre central con cuatro ruedas o sistema de base deslizante.
- Versátil y económico, el sistema remolcable hizo que la irrigación mecanizada sea accesible a más agricultores.
- Fácilmente adaptable a diferentes tamaños de áreas de cultivo.

## **2.2.9 Intensidad de aplicación del riego**

### **2.2.9.1 Baja intensidad de aplicación**

Al suministrar la mayor superficie posible de cobertura instantánea se reduce al máximo el impacto sobre la superficie del suelo y el cultivo. Este aspecto crítico del desempeño de un aspersor se asemeja a la necesidad de colocar neumáticos anchos y no angostos en la maquinaria

agrícola para reducir la compactación del suelo durante las labores de campo. Cuanto mayor sea la superficie de suelo que recibe agua en un momento dado del funcionamiento de un aspersor, tanto menor será el impacto del patrón de aspersión sobre la estructura del suelo y se preservará la capacidad de absorción de agua del mismo. Una mayor superficie de cobertura instantánea también reduce la velocidad de absorción de agua que se le requiere al suelo. Si se mantiene la velocidad de absorción y un mayor tiempo de absorción, se reduce en gran manera el potencial de escurrimiento del agua de riego y la posibilidad de que las ruedas del equipo de riego formen huellas profundas en la tierra mojada. Barnéond A, JF. (2011).

### **2.2.9.2 Presión ultra-baja**

Barnéond A, JF. (2011) establece que la línea de productos de pivote central de Senninger Irrigation está diseñada para obtener un máximo desempeño a presiones ultra-bajas de 10 a 15 psi (0.69 a 1.04 bar) y a una presión máxima recomendada de 20 psi (1.38 bar). Menor presión significa menor requerimiento y consumo de energía. Estas bajas presiones operativas ofrecen a muchos de los regantes una tremenda oportunidad de reducir sus costos totales de bombeo. Los productos específicamente diseñados para brindar máximo desempeño en este rango de bajas presiones permiten a un regante de pivote central afrontar todos los desafíos de la actualidad.

### **2.2.9.3 Baja intensidad de aplicación**

- Es la que más se aproxima a la tasa de infiltración del suelo.
- Mantiene la composición del suelo
- Minimiza la acumulación de agua en superficie
- Conserva una buena estructura del suelo.

### **2.2.9.4 Alta intensidad de aplicación ( $I_r > I_b$ )**

- Excede la tasa de infiltración del suelo.
- Modifica la composición del suelo.
- Las partículas de limo y arcilla quedan suspendidas en el agua estancada.
- Se degrada la estructura del suelo.

### 2.2.9.5 Suelo sano

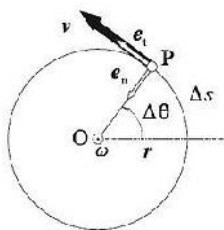
- Temporada temprana, típicamente pre-germinación
- Buena estructura del suelo
- Las partículas pequeñas del suelo se mantienen dispersas entre las partículas más grandes.
- Máxima capacidad de infiltración del suelo

### 2.2.9.6 Integridad del patrón de aspersión

- Para obtener un máximo desempeño se requiere también un patrón de aspersión que mantenga su integridad en condiciones de mucho viento y que reduzca al máximo la deriva por viento y la pérdida por evaporación. La clave para cumplir con este objetivo es producir un patrón de aspersión de gotas de tamaño relativamente uniforme, adecuado para resistir la distorsión causada por el viento. Las gotas que son demasiado pequeñas para mantener una buena integridad del patrón pueden reducir significativamente la uniformidad de distribución. La deriva por viento y la pérdida por evaporación debidas a gotas pequeñas reducen la eficacia del riego y derrochan agua y energía. El tamaño óptimo de gota es el máximo tamaño posible que no cause efectos adversos sobre el suelo o el cultivo. Barnéond A, JF. (2011)

### 2.2.10 Velocidad angular

Montero (1997). El movimiento de rotación es una trayectoria circular de un punto del sólido alrededor del eje de rotación. Para un objeto que gira alrededor de un eje, cada punto del objeto tiene la misma velocidad angular. La velocidad tangencial de cualquier punto es proporcional a su distancia del eje de rotación. Las unidades de velocidad angular son los radianes/segundo.



En un movimiento circular uniforme, dado que una revolución completa representa  $2\pi$  radianes, se tiene:

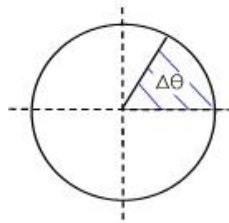
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Donde:  $T$  es el período (tiempo en dar una vuelta completa) y  $f$  es la frecuencia (número de revoluciones o vueltas por unidad de tiempo).

De modo que:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{v}{r} \quad \Rightarrow \quad v = \omega r$$

La velocidad angular es la rapidez con la que varía el ángulo en el tiempo y se mide en radianes / segundos. ( $2\pi$  [radianes] =  $360^\circ$ )



Por lo tanto si el ángulo es de 360 grados (una vuelta) y se realiza por ejemplo en un segundo, la velocidad angular es:  $2\pi$  [rad / s]. Si se dan dos vueltas en 1 segundo la velocidad angular es  $4\pi$  [rad / s]. Si se da media vuelta en 2 segundos es  $1/2\pi$  [rad / s]. La velocidad angular se calcula como la variación del ángulo sobre la variación del tiempo.

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Considerando que la frecuencia es la cantidad de vueltas sobre el tiempo, la velocidad angular también se puede expresar como:  $\omega = 2\pi f$

### **III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

En la actualidad, en Finca Alaska, Caballo Blanco se cultivan 2,700 hectáreas de caña de azúcar, 490 hectáreas cultivadas con sistemas de riego mecanizado y 2,210 hectáreas con sistemas de mini aspersión, anualmente se producen 125 toneladas cortas/ha de caña con mini aspersión y 150 toneladas/Ha con riego mecanizado; con rendimiento de 200 libras de azúcar por tonelada de caña, en promedio se producen 137.5 toneladas de caña por hectárea, aunque el rango de producción va desde 75 toneladas por hectárea en áreas que carecen de riego, hasta 150 toneladas por hectárea en áreas en las que se aplica riego.

Los sistemas de riego que se utilizan en la agroindustria azucarera han permitido sostener hasta cierto punto las producciones; sin embargo, se han detectado problemas de índole económica, ambiental y de manejo, aun no resueltos. Incluso, en algunas plantaciones con caña se sigue utilizando el sistema de riego por gravedad, con altas cantidades de agua y tiempo, y con altos costos y pérdida del recurso agua. Y el sistema de aspersión cañón, con altos caudales requeridos y baja eficiencia de operación y pérdida de agua por escorrentía.

El área que es irrigada por gravedad ha disminuido en los últimos cinco años, siendo necesario optar por otros sistemas que ayuden a conservar las fuentes, y reducir los costos de operación; consecuentemente se hace necesario evaluar cuatro velocidades de funcionamiento en un sistema piloto de pivote central, el cual se analizará técnicamente; considerando que la lámina de riego aplicada, varía en función de la velocidad de operación del pivote; así también afectando directamente en la escorrentía, uniformidad de aplicación y erosión. Económicamente, determinando el costo por mm de agua perdido; con la finalidad de determinar y proyectar su viabilidad de uso y expansión, como una alternativa de aplicar riego en caña de azúcar con una mayor eficiencia y con mayores beneficios económicos.

### **3.2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

Durante los últimos tres años, se han realizado inversiones en sistemas de riego más modernos, que permitan utilizar el agua de una manera más eficiente y a menor costo, un sistema de riego alternativo lo ha constituido el pivote central; tiene la característica de utilizar menos mano de obra por ser un riego mecanizado y la demanda de energía es menor, comparada con la que requiere un sistema de aspersión móvil, cuyos aspersores funcionan eficientemente a una presión no menor de sesenta libras por pulgada cuadrada (psi).

La actividad del riego en la zona cañera en la zafra 2,013/14 alcanzó un crecimiento de 6.17 veces más en relación a lo que se regaba en la zafra 1,990/91. Este crecimiento confirma que el riego es una de las actividades en la secuencia de labores más importantes en el incremento en la producción de las TCH. A evolucionado la actividad del riego en forma lineal, lo que indica que en este ritmo, la actividad del riego está creciendo cada año 10,144 ha, crecimiento influenciado por la expansión longitudinal de la siembra de caña de azúcar hacia el Este y Oeste, en donde para ser productivo la actividad del riego es obligada. O Castro 2014.

El sistema de riego por medio de pivote central fijo es utilizado por su facilidad de operación y eficiencia en la aplicación del recurso agua a los cultivos, sin embargo se requiere determinar la velocidad de operación idónea, la velocidad de infiltración básica del suelo, determinar la uniformidad de descarga de los difusores, así la intensidad de aplicación del agua al suelo, con el fin de ahorrar agua y energía, Siendo este el propósito principal de la presente investigación.



## **IV. OBJETIVOS**

### **4.1 GENERAL**

Evaluar cuatro velocidades de funcionamiento del sistema de riego pivote central fijo, para determinar su eficiencia en el manejo convencional del cultivo de caña de azúcar.

### **4.2 ESPECÍFICOS**

- Cuantificar los efectos de la velocidad de operación, en la intensidad de aplicación de riego, en la velocidad de infiltración básica del suelo, escurrimiento, y erosión del suelo, de cada tratamiento.
- Evaluar comparativamente las cuatro velocidades de funcionamiento en relación a uniformidad de cobertura de riego.
- Evaluar los indicadores financieros del funcionamiento del riego pivote central.

## **V. HIPÓTESIS**

- Al menos una velocidad de funcionamiento del equipo de riego tendrá un efecto diferente en la intensidad de aplicación del riego.
- Al menos una velocidad de funcionamiento del equipo de riego tendrá un mayor efecto sobre la velocidad de infiltración del agua de escurrimiento.
- Al menos una velocidad de funcionamiento del equipo de riego tendrá un mayor efecto sobre la erosión del suelo.
- Al menos una velocidad de funcionamiento del equipo de riego tendrá un efecto diferente sobre la uniformidad de cobertura del riego.

## **VI. METODOLOGÍA**

### **6.1 LOCALIZACIÓN DEL TRABAJO**

Esta evaluación se realizó en finca Alaska, Parcelamiento Caballo Blanco del departamento de Retalhuleu a 214 km de la Capital de Guatemala.

#### **6.1.1 Ubicación geográfica y política**

La finca Alaska, pertenece jurisdiccionalmente a Aldea Caballo blanco que está ubicada en una Latitud Norte de 14°29'35" y Longitud Oeste de 91°50'10" y pertenece al municipio de Retalhuleu.

#### **6.1.2 Extensión y altitud**

La extensión de Finca Alaska es de 352 hectáreas. Se encuentra a una altura de 40 msnm y con una precipitación anual promedio de 1,555 mm (datos obtenidos con GPS y pluviómetro de la finca).

#### **6.1.3 Colindancias y vías de acceso**

##### **a) Colindancias**

Al Norte con finca El chato, al Oeste con finca Paxalá, al Sur con finca Amberes y al Este con finca Arizona.

##### **b) Vías de acceso**

Se accede a partir del Kilómetro 207 en la ruta asfaltada que conduce de Retalhuleu a Champerico.

### **6.2 MATERIAL EXPERIMENTAL**

Se evaluaron cuatro velocidades de funcionamiento del sistema de riego pivote central fijo en el manejo convencional del cultivo de caña de azúcar. Las velocidades de funcionamiento consisten en 15%, 25%, 35% y 45%, según lectura del tablero eléctrico del pivote; equivalente a 27.95 m/h, 46.60 m/h, 65.20 m/h y 83.85 m/h respectivamente. En la actualidad en finca Alaska se utiliza

como estándar la velocidad de aplicación de 46.60 m/h equivalente al 25 %, siendo este tratamiento el testigo.

El manejo convencional del sistema de riego se basó en el suelo desnudo o superficie sin cobertura, permitiendo cualquier tipo de manejo para su uso, eliminando restos de cosechas anteriores.

Se utilizó un sistema de riego pivote central fijo que es un sistema de riego móvil, con un lateral que rota alrededor de un punto fijo o pivote con la toma de agua que generalmente es bombeada desde una fuente fuera del círculo. Este sistema se manejó de acuerdo a las cuatro velocidades indicadas considerando la metodología establecida, condiciones del terreno; micro-relieve, pendiente, orientación de los vientos, todo relacionado con el avance del pivote.

### 6.3. FACTOR ESTUDIADO

Consistió en evaluar cuatro velocidades de funcionamiento del sistema de riego pivote central fijo (15%, 25%, 35% y 45%), equivalente a 27.95 m/h, 46.60 m/h, 65.20 m/h y 83.85 m/h respectivamente. El factor estudiado fue velocidad de funcionamiento del sistema de riego pivote central fijo en el manejo convencional del cultivo de caña de azúcar.

### 6.4 DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

CUADRO 2. Tratamientos evaluados en el estudio de la determinación de la mejor velocidad del pivote central utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu

Tratamiento	Descripción
1 (15%)	Velocidad de operación 27.95 m/h
2 (25%) Testigo	Velocidad de operación 46.60 m/h
3 (35%)	Velocidad de operación 65.20 m/h
4 (45%)	Velocidad de operación 83.85 m/h

### 6.5 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la investigación se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones, donde los tratamientos fueron las cuatro velocidades de funcionamiento del pivote central fijo.

## 6.6 MODELO ESTADÍSTICO

El modelo Estadístico utilizado fue:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + B_j + E_{ij}$$

$Y_{ij}$  = variables de respuesta

$\mu$  = valor de la media general

$T_i$  = efecto del i-ésimo tratamiento

$B_j$  = efecto del j-ésimo bloque

$E_{ij}$  = Error experimental asociado a la ij-ésima unidad experimental.

Significa que la variabilidad de la respuesta del yij-ésimo está en función de la media general, del efecto del i-ésimo tratamiento, del efecto j-ésimo bloque y del error experimental asociado a la i-j-ésima unidad experimental.

## 6.7 UNIDAD EXPERIMENTAL

En este caso se trabajó la evaluación en un sistema de riego pivote central. El bloque tuvo repeticiones de diferente tamaño, en la primer repetición la unidad experimental (UE) estuvo constituida por 3 Has, la segunda repetición por 5 Has, la tercera repetición por 6.16 Has y la cuarta repetición 8 Has. Cada bloque estuvo formado por 22.17 Has y la unidad total del experimento fue conformada por 88.68 Has.

## 6.8. CROQUIS DE CAMPO

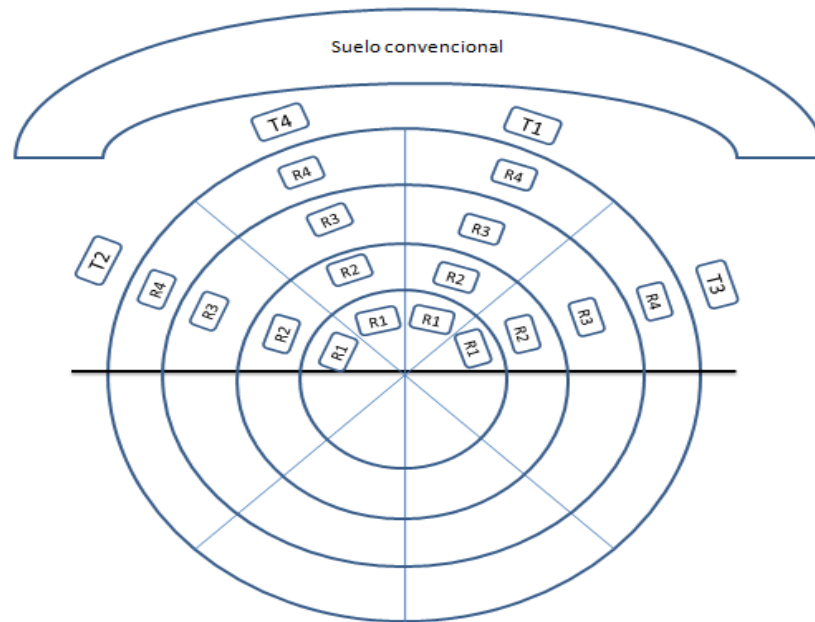


Figura 2: Croquis de campo donde se desarrolló la evaluación del pivote central fijo. Fuente. Autor

## 6.9. MANEJO DEL EXPERIMENTO

El experimento se inició midiendo la velocidad de infiltración básica del suelo, lo cual se realizó antes de la cosecha, en que las condiciones de humedad eran homogéneas en el área de estudio, durante la cosecha se consideró el área donde se quemaron los residuos de la cosecha dejando el manejo convencional del cultivo.

Inmediatamente después de la cosecha, se hizo funcionar el equipo de riego con las respectivas velocidades para hacer las mediciones de uniformidad, intensidad de aplicación, escorrentía y erosión. Al finalizar estas mediciones se procedió a su respectivo análisis, tanto agronómico como económico.

## 6.10 VARIABLES DE RESPUESTA

### 6.10.1 Prueba de velocidad de infiltración básica del suelo

Para determinar la velocidad de infiltración básica del suelo se utilizó la siguiente metodología:

Ubicación del lugar a realizar la prueba, que fue un lugar sin vegetación, grietas, sin compactación o cualquier perturbación del suelo, se enterraron los cilindros dobles a una profundidad de 10 - 15 cm. del suelo, se llenaron de agua el espacio entre ambos cilindros hasta una altura de 10 – 15 cm, se colocó el plástico en el interior del cilindro pequeño, para proteger el suelo del impacto del agua, y se llenó a una altura de 10 – 15 cm.

Con ayuda de la regla y tomando el tiempo transcurrido se llenaron las columnas tres y cinco de la hoja de registro, al inicio la velocidad de infiltración fue mayor que al final, donde se estableció de manera constante. Por lo tanto las lecturas al inicio fueron a intervalos menores de tiempo, a diferencia de las del final de la prueba. Se inició la prueba con intervalos de diez minutos, después de veinte minutos entre lecturas, posteriormente a intervalos de treinta minutos, luego cada sesenta minutos, y luego cada tres y cinco horas.

Llegó un momento en que el nivel de agua bajó tanto que fue necesario rellenar de agua a una altura de 15 cm, pero antes se anotó la lectura y el tiempo desde la lectura anterior. Se recomienda que la altura de agua no descienda los 5 cm; pues, es necesario tener agua disponible. Se mantuvo el nivel de agua en ambos cilindros, para asegurar que el agua del cilindro interior estuviera en movimiento vertical en el perfil del suelo, se finalizó la prueba, hasta que las velocidades de infiltración se hicieron constantes, finalizando la prueba después de 36 horas.

### **6.10.2 Prueba de infiltración**

Se determinó la velocidad de infiltración acumulada, integrando el tiempo de la velocidad de infiltración, con una dependencia curvilínea del tiempo y una pendiente que decrece gradualmente. La infiltrabilidad del suelo y su variación en el tiempo dependen del contenido de agua inicial y de la succión, así como de la textura, estructura y uniformidad (o secuencia de los estratos) del perfil del suelo.

Para determinar la velocidad de infiltración se utilizó la siguiente ecuación, expresada en unidades de longitud por unidad de tiempo. A saber:

$$I = K \times T^{-n} \quad 1 < n < 0 \quad (1)$$

Donde:

I = Velocidad de infiltración instantánea

T = Tiempo en minutos.

K = Constante que representa la velocidad de infiltración para t = 1.

n = Pendiente de la curva de velocidad de infiltración con respecto al tiempo.

### 6.10.3 Prueba de uniformidad

Los factores evaluados para establecer la uniformidad en la cantidad de agua fueron: Distancia entre aspersores, altura de la manguera, presión inicial y final del regulador, tipo de boquilla, desplazamiento de la última torre, descarga de los emisores y velocidad del viento.

Se midió el espaciamiento entre torres, se contó el número de torres, se realizaron las mediciones para el establecimiento de pluviómetros, la distancia recomendada entre pluviómetros es de 5 – 10 m; se midió la distancia entre el centro del pivote y el primer pluviómetro, recomendándose colocarlo de 30 – 40 m.

Durante el riego se midió la presión inicial y final del sistema, el motor (revoluciones/min), se midió la velocidad del viento con el anemómetro.

Se realizó la prueba de velocidad de desplazamiento del sistema (se midió la velocidad media de desplazamiento de la última torre), se colocó una marca de inicio en donde quedó parada la llanta de la última torre, se midió diez metros y se volvió a marcar, se tomó el tiempo que transcurrió para trasladarse de un punto a otro y se determinó la velocidad en metros por minutos.

Se midió el caudal de cada torre, por la variación de diámetro de la boquilla fue necesario medir la descarga de todos los emisores en un tiempo de diez segundos, o de tener caudalímetro, se anotó este dato y se midió la altura promedio de los aspersores, realizar la medición de la altura del suelo al emisor, debe de hacerse en tres emisores por torre.

Para la determinación de láminas es necesario conocer el diámetro de pluviómetros. Luego de medir el volumen recolectado en el pluviómetro en mm, se determinó la lámina de riego aplicando la siguiente fórmula:

$$L = (V / A) * 10 \quad \text{o} \quad (\text{Volumen} = A * \text{lámina})$$

Dónde:

L= lámina (mm), V= volumen del pluviómetro (ml), A= Área de la boca del pluviómetro (cm<sup>2</sup>)

Para la determinación del coeficiente de uniformidad de los emisores se utilizó la ecuación de Hermann y Hein (13). El coeficiente de uniformidad es afectado por el tamaño de boquilla y presión, el espaciamiento entre laterales, distancia entre aspersores y velocidad del viento. Se basa en una medición de pluviometría dentro de un área cubierta por aspersores.

$$CUh = 100 * \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Di * \left( Ci - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Ci * Di)}{\sum_{i=1}^{i=n} Di} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} Ci * Di} \right]$$

Coeficiente de uniformidad de Hermann y Hein (13).

Donde:

CUh = Coeficiente de Uniformidad de Hermann y Hein, en %.

n = Número de pluviómetros.

Ci = Cantidad de agua recogida por el pluviómetro i (con i variando entre 1 y n).

Di = Superficie regada por el pluviómetro i, o distancia del centro del pivote al pluviómetro i, o también la posición ocupada por el pluviómetro i, con un valor de 1 para el más cercano al punto pivote, 2 al siguiente y así hasta un valor n para el más alejado.

#### 6.10.4 Intensidad de aplicación

La intensidad de aplicación se determinó relacionando lámina de agua y tiempo. Esta medición se realizó colocando doce pluviómetros en cada repetición, es decir cuarenta y ocho pluviómetros por tratamiento, para controlar el tiempo en que el agua se depositó en los recipientes, se utilizó cuatro personas simultáneamente con su respectivo cronómetro, los cuales midieron el tiempo, se removieron las cubetas una por una a intervalos de tiempo establecidos en campo, esto se



realizó cuando inició el llenado y finalizó hasta que dejó de caer agua en las cubetas. Seguidamente se cuantificó la cantidad de agua depositada en el tiempo transcurrido de llenado.

### 6.10.5 Escorrentía

La parcela de medición estuvo compuesta de un área de escurrimiento con bordes y un recipiente de captación. Los bordes divisores de las parcelas, pueden ser de lámina de plycem, nylon o de zinc, enterrados de 20 a 30 cm y con una altura de 20 cm sobre el suelo. El recipiente puede ser un medio barril o cualquier tanque que se adapte al tamaño necesario, para captar el sedimento proveniente de la parcela.

Las dimensiones de la parcela pueden variar según las áreas fisiográficas de la micro cuenca, en este caso se van a utilizar parcelas de  $72 \text{ m}^2$  ( $7.2 \times 10 \text{ m}$ ).

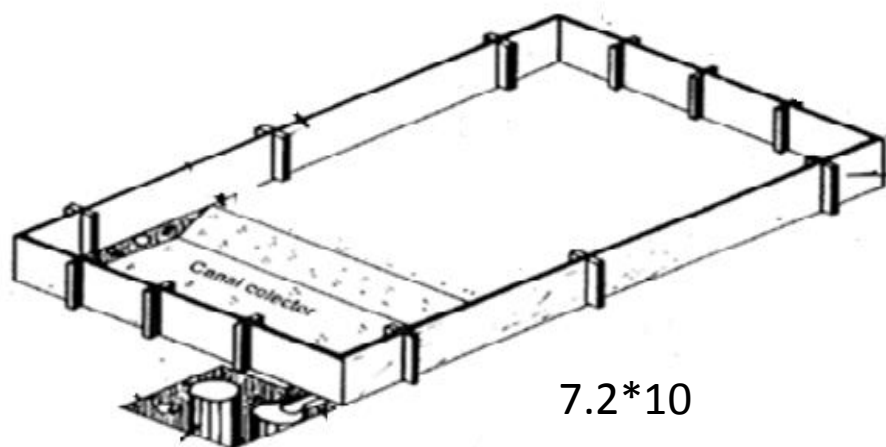


Figura 3: Esquema de una parcela de escurrimiento

Los monitoreos de los sedimentos interceptados y almacenados en los tanques, se realizaron periódicamente y en dependencia de la frecuencia e intensidad de eventos de lluvia o de riego. Puede ser semanal, cada dos semanas o una vez al mes. En este caso se realizaron en cada evento de riego.

### 6.10.6 Erosión hídrica

La parcela de medición generalmente estuvo compuesta de un área de escurrimiento con bordes y un recipiente de captación. Los bordes divisores de las parcelas, pueden ser de lámina de plycem, nylon o de zinc, enterrados 20 a 30 cm y con una altura de 20 cm sobre el suelo. El recipiente puede ser un medio barril o cualquier tanque que se adapte al tamaño necesario, para captar el sedimento proveniente de la parcela.

Para cuantificar los sólidos en suspensión, se tomó una muestra de un litro de agua escurrida en cada recipiente colector. Luego se filtró el agua, se secó el papel filtro utilizado en un horno de convección a 60°C por 12 a 24 horas. Luego de secada la muestra, se determinó su peso con la ayuda de una balanza analítica. La totalidad de suelo erosionado por evento fue expresado en toneladas por hectárea (T/Ha). Para la cuantificación de escorrentía se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{m}^3/\text{ha de escurrimiento} = \left[ \frac{\text{ASS} \times \text{LTC} \times \left[ \frac{10,000}{\text{m}^2 \text{ parcela}} \right]}{1,000} \right]$$

Donde:

ASS: Agua restante de un litro sin sedimento

LTC: Litros totales colectados

m<sup>2</sup> parcela: área de parcela de escorrentía

Las dimensiones de la parcela pueden variar según las áreas fisiográficas de la micro cuenca, en este caso se utilizaron parcelas de 72 m<sup>2</sup> (10x7.2 m).

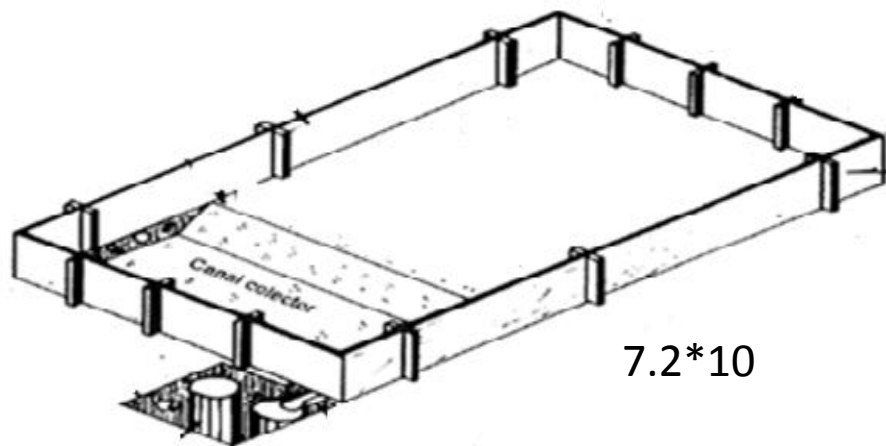


Figura 4: Esquema de una parcela de escurrimiento para erosión

#### **6.10.7 Costo de energía y agua de las mediciones**

Esta variable se realizó por cada tratamiento, tomando en cuenta la descarga de agua afectada por la velocidad evaluada (15%, 25%, 35% y 45%); la descarga de agua se midió por medio de un caudalímetro ubicado en la salida de la fuente (pozo), así mismo se determinó el consumo de combustible del motor que hace funcionar la turbina encargada de extraer el agua del pozo, este consumo va hacer influenciado por el potencia de motor, también se cuantificó el personal que operó normalmente el sistema de riego.

### **6.11 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

#### **6.11.1 Análisis estadístico**

Se realizó un análisis de varianza según diseño experimental de bloques completos al azar; y en caso de existir diferencia estadística, una prueba de comparación de medias utilizando el comparador de Tukey al 5%, para la discriminación de los tratamientos; éstos se presentan en el capítulo de Resultados y discusión.

#### **6.11.2 Análisis económico**

Consistió en determinar los costos de riego por tratamiento, con el fin de concluir la velocidad de operación que permita economía para la empresa, por medio de realizar un riego eficiente y por

ende con la menor pérdida de agua posible, en el cultivo de caña de azúcar, por medio del sistema de Pivote central fijo.

## VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 INFILTRACIÓN BÁSICA DEL SUELO

En el cuadro 3, se pueden apreciar los datos de infiltración, medidos en centímetros por hora; a los cuales se les aplicó un análisis de varianza para determinar si a lo largo de todo el pivote existía la misma infiltración. Los datos correspondientes a los puntos 1, 2, 3 y 4; corresponden a las primeras cuatro repeticiones de la velocidad del 15%; los datos 5, 6, 7 y 8; a los de la velocidad de 25%; los siguientes 4 datos corresponden a la velocidad de 35% y los últimos a la velocidad de 45%.

CUADRO 3. Datos de infiltración básica para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu

INFILTRACIÓN (cm/hr)																
Tiempo acumulado (min)	15%				25%				35%				45%			
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9	Punto 10	Punto 11	Punto 12	Punto 13	Punto 14	Punto 15	Punto 16
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90.00	-	-
10	24.00	16.8	35.40	24.00	6.60	6.60	6.00	49.2	34.80	15.60	10.20	4.80	30.00	90.00	12.00	18.00
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	67.20	-	-
20	13.80	4.2	18.00	12.60	4.20	2.40	3.00	-	-	6.00	2.40	1.80	17.40	67.20	3.00	8.40
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36.00	-	-
30	11.40	0.60	13.20	10.20	2.40	1.80	3.00	27.3	24.30	2.40	4.80	1.20	15.60	49.20	3.00	7.20
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36.00	-	-
50	9.30	3.00	9.30	3.90	1.50	0.90	2.10	19.20	22.50	4.50	4.20	1.20	10.50	34.20	2.40	6.00
70	8.40	3.00	7.80	3.60	1.50	1.20	1.80	15.00	21.90	4.50	3.00	0.60	12.00	12.90	3.00	4.50
90	9.00	2.10	10.20	3.30	1.50	0.90	2.10	19.80	18.90	5.40	2.40	0.60	9.90	9.30	1.50	5.10
120	8.20	2.40	7.20	4.20	0.80	0.60	1.80	17.60	18.00	4.60	2.40	0.40	11.40	7.40	1.00	5.20
150	6.60	2.20	7.60	4.00	1.40	0.60	1.80	22.00	19.00	3.40	2.00	0.60	10.40	7.00	2.40	4.20
180	6.40	3.60	7.00	3.60	1.20	0.40	1.40	20.20	17.40	4.00	1.40	0.40	11.20	3.60	0.80	3.80
210	-	-	-	-	-	-	-	15.00	13.80	-	-	-	-	-	-	-
240	5.60	2.30	6.90	3.60	1.60	0.30	1.80	15.20	15.20	2.80	1.50	0.50	7.50	4.60	0.90	4.10
270	-	-	-	-	-	-	-	15.20	13.00	-	-	-	-	-	-	-
300	6.60	2.20	7.10	3.80	1.00	0.50	2.70	14.60	12.00	2.60	1.30	0.40	8.20	4.30	0.80	3.90
330	-	-	-	-	-	-	-	14.20	11.20	-	-	-	-	-	-	-
360	6.70	2.00	4.60	3.70	1.00	0.40	1.40	14.40	10.60	3.50	1.30	0.60	7.60	3.80	0.90	3.80
540	0.80	1.47	0.43	0.50	0.40	0.40	0.50	0.43	1.47	0.80	0.43	0.50	0.40	1.47	0.80	0.43
720	0.93	1.10	0.33	0.63	0.30	0.30	0.63	0.33	1.10	0.93	0.33	0.63	0.30	1.10	0.93	0.33
900	1.10	0.93	0.20	0.77	0.53	0.53	0.77	0.20	0.93	1.10	0.20	0.77	0.53	0.93	1.10	0.20
1200	1.24	0.92	0.24	0.92	0.58	0.58	0.92	0.24	0.92	1.24	0.24	0.92	0.58	0.92	1.24	0.24
1500	0.88	0.80	0.18	0.74	0.30	0.30	0.74	0.18	0.80	0.88	0.18	0.74	0.30	0.80	0.88	0.18
1800	0.98	0.64	0.12	0.70	0.30	0.24	0.70	0.12	0.64	0.98	0.12	0.70	0.24	0.64	0.98	0.12
<b>lb (cm/hr)</b>	2.55	1.87	0.69	1.75	0.84	0.57	1.46	0.83	2.73	2.12	0.54	0.84	1.11	1.67	1.42	0.70
<b>lb (mm/hr)</b>	25.50	18.70	6.90	17.50	8.40	5.70	14.60	8.30	27.30	21.20	5.40	8.40	11.10	16.68	14.18	7.00

En el cuadro 4, se muestran el resumen de los resultados, por tratamiento y repetición; datos utilizados para la realización del Análisis de Varianza para la variable Infiltración básica del suelo:

CUADRO 4: Resumen de datos de infiltración básica para cuatro velocidades del pivote central utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

Bloque	Velocidad a 15%	Velocidad a 25%	Velocidad a 35%	Velocidad a 45%
I	25.5	8.4	27.3	11.1
II	18.7	5.7	21.2	16.7
III	6.9	14.6	5.4	14.2
IV	17.5	8.3	8.4	7
<b>Total mm/hora</b>	<b>68.6</b>	<b>37</b>	<b>62.3</b>	<b>49</b>
<b>Promedio por tratamiento</b>	<b>17.15mm/h</b>	<b>9.25mm/h</b>	<b>15.57mm/h</b>	<b>12.25mm/h</b>

De los datos del cuadro anterior, se puede visualizar que existe alta variabilidad en la infiltración, obedeciendo esto principalmente al tipo de suelo (arcilloso) donde se llevó a cabo el experimento (imagen en anexo).

El dato promedio aritmético de todo el recorrido del pivote central de infiltración básica es de 13.56 mm/h, tomando en cuenta suelo de textura arcillosa según análisis, sin embargo acá aplica el promedio ponderado, en relación al área, el cual fue de 12.54 mm/h.

Se realizó un análisis de varianza para los datos obtenidos, según el diseño de investigación propuesto, cuyos resultados se presentan en el cuadro 5.

CUADRO 5: Análisis de Varianza para los datos de infiltración básica para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

Causas de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	Factor calculado (Fc)	Factor tabulado (Ft)
Tratamiento	148.96	3	49.65	1.08	<b>0.05: 3.86 NS</b>
Bloque	183.46	3	61.15	1.33	<b>0.05: 3.86 NS</b>
Error	413.32	9	45.92		
Total	745.74	15			

A partir del análisis de varianza realizado para “Infiltración” se pudo determinar que no existe diferencia estadística significativa para tratamientos, ni para bloques o repeticiones.

Con respecto al análisis de varianza cabe indicar que a pesar de que existe diferencia matemática entre los cuatro tratamientos, no se alcanza un diferencial estadístico, por lo cual se rechaza la hipótesis planteada para la investigación en lo referente a desigualdad estadística entre los resultados de los cuatro tratamientos.

En el cuadro 6 se presenta datos de infiltración básica, área por punto de muestreo y el área total irrigada en hectáreas.

CUADRO 6: Promedio Ponderado de Infiltración Básica del suelo en finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

Datos	Infiltración Básica	Área/Punto Muestra	% Área	Área (ha) total irrigada
1	27.3	3	3%	<b>44.32 = 50 %</b>
2	25.5	3	3%	
3	21.2	5	6%	
4	18.7	5	6%	
5	17.5	8	9%	
6	16.7	5	6%	
7	14.6	6.16	7%	
8	14.2	6.16	7%	
9	11.1	3	3%	
10	8.4	8	9%	<b>44.32 = 50 %</b>
11	8.4	3	3%	
12	8.3	8	9%	
13	7	8	9%	
14	6.9	6.16	7%	
15	5.7	5	6%	
16	5.4	6.16	7%	
<b>Totales</b>	<b>12.54</b>	<b>88.64</b>	<b>100%</b>	<b>88.64</b>

En el cuadro 6, se determinó el promedio ponderado de Infiltración Básica del suelo, el cual consiste en 12.54 mm/hora, seguidamente se muestran los resultados de cada punto de muestreo, ordenado de mayor a menor en cuanto a los mm infiltrados por hora, así mismo el área que representa cada punto de muestreo.

De acuerdo a esta área, se determinó que el 50 % de la misma, los valores de infiltración básica del suelo oscilan entre 11.1 a 27.3 mm/hora y el otro 50 % de 5.4 a 8.4 mm/hora, la cual significa

que el 50 % del área es mejor irrigada por el sistema de riego pivote central fijo, lo contrario del otro 50 %.

En el cuadro 7 se presentan los datos de intensidad de aplicación en mm/h e infiltración básica ponderada en mm/h.

CUADRO 7: Datos de Promedio Ponderado he Infiltración Básica de suelo en milímetros/hora, finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu

Tratamientos	Intensidad Aplicación mm/h	Promedio Ponderado IB del suelo
15%	31.68	12.54
25% testigo relativo	15,87	12.54
35%	13.71	12.54
45%	10.68	12.54

**Condición:  $I_r \leq I_b$**

Del cuadro 7 se puede apreciar que para 15% velocidad de aplicación se tuvo una intensidad de 31.68 mm/h, para 25 % corresponde 15.87 mm/h, para 35 % 13.71 mm/h y para 45% velocidad le corresponde 10.68 mm/h, También se observa que la infiltración básica ponderada es de 12.54 mm/h, con respecto al área irrigada por tratamiento.

Considerando que el estudio se realizó en un suelo de textura arcillosa se elaboró un análisis de correlación entre la infiltración básica obtenida con datos de campo mediante la utilización del modelo de Kostiakov-Lewis y el % de arcilla de las muestras, de donde se obtuvo un valor de  $r^2$  de 42 %, significa esto que además de este, existen otros factores que pueden estar influyendo en la Infiltración Básica, por ejemplo: compactación de suelo por labores mecanizadas. En la figura 200 se puede apreciar la gráfica del análisis mencionado así como también los índices de correlación determinados.

## 7.2. UNIFORMIDAD DE RIEGO

A continuación se presentan los datos de la uniformidad del riego en Caña de Azúcar, usando el Pivote Central fijo, para cada una de las diferentes velocidades evaluadas, 15, 25, 35 y 45% en el estudio de Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

El resumen de las pruebas de uniformidad de riego se presenta en el cuadro 8, agrupado en dos radios, es decir dos diámetros diferentes de pluviómetros, donde se ven los coeficientes de uniformidad y de distribución; así también la lámina de agua requerida y aplicada, para cada una de las velocidades en estudio.

CUADRO 8 : Datos de los coeficientes de Uniformidad de aplicación de riego para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu

Tratamiento	Fecha	Finca	Funcionamiento	Velocidad	Frecuencia (días)	Laminia requerida (mm)	Radio 1				Radio 2			
							Davg (mm)	Bloc (mm)	CD (%)	CU (%)	Davg (mm)	Bloc (mm)	CD (%)	CU (%)
1	23/04/2015	Alaska	Electrico	15	7	38.1	35	27.6	79	86.6	36.6	28.8	78.9	88.1
2	23/04/2015	Alaska	Electrico	25	4.22	23.29	24.9	17.9	72.1	83.8	23.4	18.2	78.1	87.6
3	23/04/2015	Alaska	Electrico	35	3.02	16.63	19.6	14.5	74.2	82.3	14.5	11.6	80	87.7
4	23/04/2015	Alaska	Electrico	45	2.35	12.94	12.5	9.3	74.4	85.3	14.2	11.8	83.1	88.2

DONDE:

% UC = Coeficiente de uniformidad

% UD = Coeficiente de distribución

Davg = Dosis promedio ó lámina promedio (mm)

Dlq = Dosis del 25% más bajo o lámina promedio del 25% más bajo.

El resumen de los datos de los coeficientes de Uniformidad del riego para ambos radios, se presentan en el cuadro 9, los cuales se utilizaron para realizar el análisis de varianza respectivo y poder establecer alguna diferencia estadística significativa entre las diferentes velocidades del pivote. Es importante mencionar que la uniformidad del riego en este sistema puede ser influenciada por distintas causas, tales como: caudal inadecuado, boquillas sucias o en mal estado, producción de arena del pozo y capacidad de la bomba sumergible. En la presente evaluación no se tuvieron estos inconvenientes.



CUADRO 9: Resumen de datos de Uniformidad de riego, para los dos radios utilizados, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu

Tratamiento	Bloque 1	Bloque 2
	Coefficiente de uniformidad Radio 1 (del pluviómetro)	Coefficiente de uniformidad Radio 2 (del pluviómetro)
Velocidad al 15%	86.6	88.1
Velocidad al 25%	83.8	87.6
Velocidad al 35%	82.3	87.7
Velocidad al 45%	83.1	88.2
<b>Promedio</b>	<b>83.93</b>	<b>87.90</b>

Referente a los radios utilizados, puede observarse que existe diferencia entre los radios, lo cual se debe a la utilización pluviómetros con diámetros diferentes. En el radio 1, se utilizaron pluviómetros con menor diámetro (menos área expuesta al evento de riego), ocurriendo lo contrario en el radio 2. Sin embargo, ambos radios están dentro del rango aceptable de uniformidad, según Christiansen, establecido entre 82 y 88%, para el sistema de riego pivote central fijo.

Luego de realizado el análisis de varianza para los coeficientes de uniformidad de riego en la Caña de Azúcar, para la información obtenida tanto del primer radio como los del segundo de los pluviómetros, los cuales se muestra en los cuadros 10 y 12, respectivamente; donde se puede apreciar que si existió diferencia estadística para los diferentes tratamientos o velocidades del pivote. Lo anterior indica que los coeficientes de uniformidad de riego varían según las diferentes velocidades del pivote; así también que si se manifestó una diferencia entre bloques lo que indica que el diseño utilizado fue el adecuado.

CUADRO 10: Análisis de Varianza para los datos de Uniformidad de aplicación de riego, en radio 1, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu

Causas de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Factor calculado	Factor tabulado
Tratamientos	1629379	3	543126.3125	83.4851	0.000 **
Bloque	93371	3	31123.6660	4.78	0.029**
Error	58551	9	6505.6665		
Total	1781301	15			CV=8.84%

Para establecer la diferencia entre las descargas en milímetros, según la velocidad del pivote, se realizó la respectiva prueba de promedios, la cual se muestra en el cuadro 11; incluyendo además su coeficiente de uniformidad.

CUADRO 11: Prueba múltiple de promedios para los datos de Uniformidad de aplicación de riego, para radio 1, utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu

TRATAMIENTO	PROMEDIO	LITERAL	Cu
1 Velocidad 15%	1,377.95	A	86.6
2 Velocidad 25%	994.44	B	83.8
3 Velocidad 35%	769.62	C	82.3
4 Velocidad 45%	508.06	D	83.1

COMPARADOR 5%= 178.2535

En el cuadro 12, se muestra el análisis de varianza para los datos de uniformidad para el radio 2.

CUADRO 12: Análisis de Varianza para los datos de Uniformidad de aplicación de riego, en radio 2, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

Causas de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Factor calculado	Factor tabulado
Tratamientos	8502120	3	2834040	167.7432	0.000 **
Bloque	96900	3	32300	1.91	0.198 nS
Error	152056	9	16895.11		
Total	8551076	15			CV=7.96%

Se puede apreciar que si existió diferencia estadística significativa, para los diferentes tratamientos, no así para bloques. Por lo que se procedió a realizar su respectivo análisis de promedios, como se muestra en el cuadro 13.

CUADRO 13: Prueba múltiple de promedios para los datos de Uniformidad de aplicación de riego, para el radio 2, utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu

TRATAMIENTO	PROMEDIO	LITERAL	C.U.
1 Velocidad 15%	2,806.94	A	88.1
2 Velocidad 25%	1,678.72	B	87.6
3 Velocidad 45%	1,024.24	C	87.7
4 Velocidad 35%	1,020.86	C	88.2

COMPARADOR 5% = 287.258

### 7.3. INTENSIDAD DE APLICACIÓN (mm/h)

CUADRO 14: Datos de Intensidad de aplicación del riego, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

Bloque	Velocidad 15%	Velocidad 25%	Velocidad 35%	Velocidad 45%
I	1650.75	541.25	408.67	259.46
II	1320.50	762.50	601.25	415.08
III	1395.00	880.42	583.33	433.42
IV	1027.17	635.83	444.17	380.00
<b>Total ml</b>	<b>1,348.35</b>	<b>705.00</b>	<b>509.35</b>	<b>371.99</b>

En el cuadro 14, se presentan los datos en ml o lecturas de los pluviómetros, ubicados por debajo del pivote central fijo, donde se obtuvo la información para las diferentes velocidades de éste, al 15, 25, 35 y 45%, respetivamente.

Con los datos del cuadro 14, se realizó el análisis de varianza para la variable Intensidad de aplicación del riego, según se muestra el cuadro 15.

CUADRO 15: Análisis de Varianza para los datos de Intensidad de aplicación de riego, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu

Causas de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Factor calculado	Factor tabulado
Tratamientos	2239156	3	746385.3125	30.5742	0.000 **
Bloque	90183	3	30061	1.23	0.354 NS
Error	219710	9	24412.222		
Total	2549049	15			CV=20.29%

Del cuadro anterior, se puede ver que si existe diferencia estadística significativa para la intensidad de aplicación, en las diferentes velocidades del pivote. Para determinar la velocidad que presenta la mayor intensidad, se realizó la prueba múltiple de promedios, al 5%, como se ve en el cuadro 16.

CUADRO 16: Prueba múltiple de promedios para los datos de Intensidad de aplicación de riego, utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu

TRATAMIENTO	PROMEDIO	LITERAL
15%	1348.35	A
25%	705	B
35%	509.355	B
45%	371.989	B

COMPARADOR 5%= 345.2995

Del cuadro 16, se puede ver que la mayor intensidad de aplicación de riego ocurrió cuando el pivote avanza a una velocidad de 15%; mientras que las velocidades de 25, 35 y 45%, mostraron resultados similares, estadísticamente entre ellas.

Relacionando datos de velocidad de operación (o tratamientos), intensidad de aplicación e infiltración básica del suelo, se presenta el cuadro 17.

CUADRO 17: Datos de velocidad de operación (m/h), intensidad de aplicación (mm/h) y promedio ponderado infiltración básica del suelo (mm/h), finca Alaska Caballo Blanco, Retalhuleu.

Tratamiento	Velocidad de operación m/h	Intensidad Aplicación Mm/h	Promedio P IB del suelo
15%	27.95	31.68	12.54
25%	46.6	15.87	12.54
35%	65.2	13.71	12.54
45%	83.85	10.68	12.54

Según datos del cuadro 17, para el 15 % la velocidad de operación es de 27.95 m/h correspondiendo a una intensidad de 31.68 mm/h, para 25 % 46.6 m/h y 15.87 mm/h, para 35 % 65.2 m/h correspondiente a 13.71 mm/h y para 45 % 83.85 m/h para 10.68 mm/h. Se puede ver también que en la medida que la velocidad de operación del pivote se incrementa, la intensidad de aplicación disminuye.

En la figura 4 se muestra la relación encontrada entre la intensidad de aplicación y la infiltración básica del suelo, en condiciones de finca Alaska.

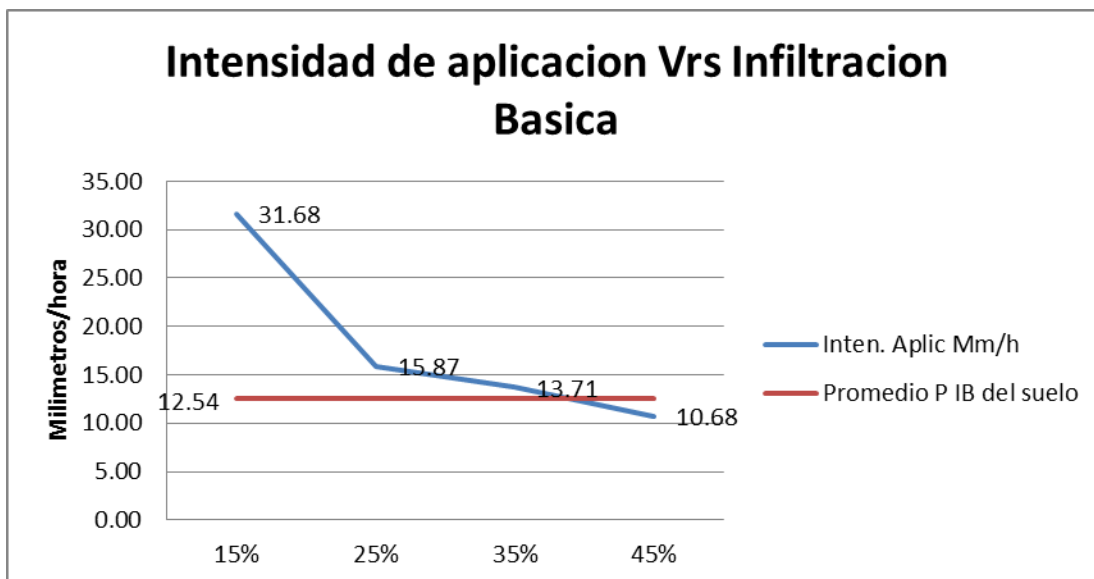


Figura 5: Intensidad de aplicación vrs Infiltración Básica del suelo, finca Alaska Caballo Blanco Retalhuleu. Fuente: autor

La grafica indica que la velocidad optima de operación del pivote debe ser del 45 %, es decir, entre 85 m/h. esto se obtiene cuando la línea de intensidad de aplicación se intercepta con la línea de la infiltración básica del suelo; interpretándose que en ese punto existe mínima escorrentía.

#### 7.4. ESCORRENTÍA

Una vez evaluadas cada una de las velocidades, se recolectaron las muestras de agua y fueron trasladadas al laboratorio agronómico del Instituto del Cambio Climático –ICC-, en dónde; con el apoyo de personal del programa de investigación de suelos, se analizaron las muestras, obteniendo las relaciones de suelo peso seco y humedad, escorrentía y erosión, respectivamente.

Según resultados, las velocidades de infiltración del suelo son menores que las velocidades de intensidad del riego aplicado, por lo que se tiene un potencial de escorrentía, el cual se reduce a medida que la velocidad de riego es mayor, debido a que se aplica una menor lámina de riego a un menor tiempo, reduciendo el impacto en el suelo.

CUADRO 18: Datos de velocidad de operación (m/h), intensidad de aplicación (mm/h), promedio ponderado infiltración básica del suelo (mm/h) y escorrentía total (m<sup>3</sup>) finca Alaska Caballo Blanco, Retalhuleu

Tratamiento	Velocidad de operación m/h	Intensidad Aplicación Mm/h	Promedio P IB del suelo	Escorrentía total (m <sup>3</sup> )
15%	27.95	31.68	12.56	23,516.43
25%	46.6	15.87	12.56	13,840.02
35%	65.2	13.71	12.56	7,292.04
45%	83.85	10.68	12.56	6,063.29

Los días de riego evaluados fueron 71, esto correspondiente a las primeras etapas fenológicas del cultivo. El volumen de escorrentía provocado por las velocidades evaluadas, van de 6,063.29, a 23,516.43 metros cúbico (cuadro 19).

CUADRO 19: Cuadro resumen de área por tratamiento, número de riegos aplicados, lámina de agua aplicada, intensidad de aplicación, metros cúbicos por hectárea, metros cúbicos por temporada de riego y la Escorrentía producida en metros cúbicos, en el área irrigada, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

Tratamiento	Total área del pivote (Has)	Número de riegos	Lámina aplicada (mm)	Intensidad de aplicación de riego (mm/h)	m <sup>3</sup> /Ha	m <sup>3</sup> /temporada de riego	Escorrentía total (m <sup>3</sup> )
T1R1(15%)	24.0	10.14	38.1	75.73	0.04	10.49	
T1R2(15%)	40.0	10.14	38.1	266.59	12.37	4949.97	
T1R2(15%)	49.28	10.14	38.1	303.27	17.88	8809.90	
T1R2(15%)	64.0	10.14	38.1	854.94	15.23	9746.06	23,516.43
T2R1(25%)	24.0	16.82	23.29	83.64	0.13	53.19	
T2R2(25%)	40.0	16.82	23.29	228.66	2.44	1662.51	
T2R2(25%)	49.28	16.82	23.29	358.63	6.77	5668.62	
T2R2(25%)	64.0	16.8	23.29	408.32	7.71	6455.7	13,840.02
T3R1(35%)	24.0	23.43	16.63	80.79	0.14	82.47	
T3R2(35%)	40.0	23.43	16.63	175.10	0.69	658.57	
T3R2(35%)	49.28	23.43	16.63	354.35	2.45	2897.20	
T3R2(35%)	64.0	23.43	16.63	706.38	2.38	3653.80	7,292.04
T4R1(45%)	24.0	30.21	12.94	93.15	0.00	0.00	
T4R2(45%)	40.0	30.21	12.94	350.85	0.66	819.24	
T4R2(45%)	49.28	30.21	12.94	764.7	1.30	1979.05	
T4R2(45%)	64.0	30.21	12.94	115.93	1.65	3265.00	6,063.29

De la riqueza de información del cuadro 19, se extrae el valor de la variable en estudio Escorrentía total, medida en metros cúbicos por cada tratamiento y repetición, cuya información se resume en el cuadro 20.

CUADRO 20: Cuadro resumen de Escorrentía producida en el área irrigada, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

Bloque	Velocidad 15%	Velocidad 25%	Velocidad 35%	Velocidad 45%
I	0.33	0.19	0.10	0.09
II	93.5	55.17	28.99	24.31
III	136	80.24	42.16	35.36
IV	116	68.44	35.96	30.16
<b>Total lts</b>	<b>345.83</b>	<b>204.04</b>	<b>107.21</b>	<b>89.92</b>

Del cuadro 20, se puede ver que la mayor cantidad de escorrentía ocurre cuando la velocidad del pivote es menor. El resultado es lógico, ya que a menor velocidad del pivote, existe mayor cantidad de agua aplicada en el mismo lugar, la cual no se infiltra a la misma velocidad, por lo que se produce la escorrentía. Misma relación se puede establecer que a mayor velocidad del pivote menor escorrentía.

Para establecer si existe alguna diferencia estadística entre las diferentes cantidades de escorrentía determinadas, se procedió a realizar el respectivo análisis de varianza para dichos datos el cual se presenta en el cuadro 21, a continuación.

CUADRO 21: Análisis de Varianza para Escorrentía producida en el área irrigada, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

Causas de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	Factor calculado (fc)	Factor tabulado (ft)	
Tratamiento	10327.02	3	3443.34	8.31	<b>0.05: 3.86*</b>	<b>0.01: 6.55**</b>
Bloque	12591.35	3	4197.12	10.13	<b>0.05: 3.86*</b>	<b>0.01: 6.55**</b>
Error	3728.64	9	414.29			
Total	26647.01	15				

A partir del análisis de varianza realizado para “Escorrentía” se concluye que: Existe diferencia significativa para tratamientos y también existe diferencia estadística entre bloques.

Es importante resaltar la diferencia agronómica manifestada en la presente investigación, ya que los valores de escorrentía total expresados en metros cúbicos fueron los siguientes: velocidad de 15%, 23,516.43 m<sup>3</sup> de escorrentía, velocidad de 25%, 13,840.02m<sup>3</sup> de escorrentía, velocidad de 35%, 7,292.04m<sup>3</sup> de escorrentía y velocidad de 45% con un valor de 6,063.29m<sup>3</sup> de escorrentía.

Para establecer cuál fue la diferencia real entre los diferentes tratamientos estudiados, se procedió a efectuar la prueba múltiple de promedios, utilizando el comparador de Tukey al 5% de significancia, cuyos resultados se muestran en el siguiente cuadro.



CUADRO 22: Análisis Post Andeva para la Escorrentía producida en el área irrigada, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

Tratamiento	Escorrentía Promedio (litros)	LITERAL
15%)	86.46	A
25%	51.01	A
35%	26.80	B
45%	22.48	B

Tukey Wp. 44.99 (0.05)

El análisis post andeva indica que los diferentes tratamientos o velocidades del pivote se agrupan en dos; los que provocan la menor escorrentía y significativamente iguales son la velocidad al 35 y 45% y los que provocan la mayor escorrentía son las velocidades a 15 y 25%. Es decir que a mayor velocidad del pivote, habrá una menor escorrentía para el tipo de suelo donde se realizó el presente estudio.

## 7.5. EROSIÓN HÍDRICA

En cuanto a los resultados sobre las tasas de erosión, se tiene que estas pueden estar entre 0.67 a 17.07 T/Ha/época de riego, considerando el total del área irrigada por el sistema de riego evaluado, dónde la máxima tasa de erosión corresponde al tratamiento 1 velocidad 15 %.

CUADRO 23: Datos de velocidad de operación (m/h), intensidad de aplicación (mm/h), promedio ponderado infiltración básica del suelo (mm/h), escorrentía total (m<sup>3</sup>) y tasa de erosión total, finca Alaska Caballo Blanco, Retalhuleu

Tratamiento	Velocidad de operación m/h	Intensidad Aplicación Mm/h	Promedio P IB del suelo	Escorrentía total (m <sup>3</sup> )	Tasa de erosión totales (T/Ha/año)
15%	27.95	31.68	12.54	23,516.43	17.07
25%	46.6	15.87	12.54	13,840.02	5.36
35%	65.2	13.71	12.54	7,292.04	2.33
45%	83.85	10.68	12.54	6,063.29	0.67

Los resultados obtenidos, muestran que la mejor velocidad es a 45 %, ya que con esta se mantiene el nivel de erosión leve a nulo (<10 T/Ha/año), de acuerdo con la FAO, 1,979. Siendo

este nivel de erosión considerado como natural, ya que según PRODESNOS (2011) Y Morgan R.P.C (2006) citado por Dumas Salazar (2012); la tasa máxima permisible, cuando se habla de erosión del suelo es de 10 toneladas/hectárea/año, ya que se calcula que esta es la velocidad a la que el suelo se regenera, por lo que todo territorio cuyas pérdidas de suelo no superen las 10 T/Ha/año no presentarán pérdidas netas debido a la erosión.

A continuación se presentan los resultados para erosión, en cuadro 16, mostrando los diferentes tratamientos con sus respectivas repeticiones, como insumos para la realización del respectivo análisis de varianza.

CUADRO 24: Datos de Erosión hídrica producida en el área irrigada, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

<b>Bloque</b>	<b>Velocidad 15%</b>	<b>Velocidad 25%</b>	<b>Velocidad 35%</b>	<b>Velocidad 45%</b>
I	2.22	0.67	0.35	0
II	0	0.74	0.9	1.06
III	3.34	1.41	0.84	0.69
IV	3.16	1.54	1.26	0.88
<b>Total kg</b>	<b>8.72</b>	<b>4.36</b>	<b>3.35</b>	<b>2.63</b>

En la tabla de resultados anterior, puede observarse que no existe un comportamiento paulatino y consecuente entre la velocidad de riego y el índice de erosión. A este respecto cabe mencionar que en el área experimental existieron variables externas incidentes en los resultados, tales como la textura y estructura del suelo. El comportamiento de los diversos tratamientos desde el enfoque agronómico, es lógico, tomando en cuenta que existe una reducción paulatina de la erosión, en la medida en que se incrementa la velocidad del riego.

CUADRO 25: Análisis de Varianza, para la Erosión hídrica producida en el área irrigada, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

Causas de variación	Sumatoria de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	Factor calculado (fc)	Factor tabulado (ft)	
Tratamiento	5.59	3	1.86	3.11	<b>0.05:</b> <b>3.86NS</b>	<b>0.01: 6.55NS</b>
Bloque	3.29	3	1.10	1.83	<b>0.05:</b> <b>3.86NS</b>	<b>0.01: 6.55NS</b>
Error	5.44	9	0.60			
Total	14.32	15				

A partir del análisis de varianza realizado para “Erosión” se concluye que: No existe diferencia significativa para tratamientos y tampoco existe diferencia estadística entre bloques. Debe considerarse que estas tasas de erosión y escorrentía están consideradas para las primeras etapas fenológicas del cultivo (escaza cobertura vegetal y 71 días de riego), pendientes mínimas (< 1%) y solo el efecto del riego. Por lo que para considerar la implementación de alguna práctica de conservación de suelos, se debe evaluar la erosión hídrica durante todo el ciclo del cultivo.

## 7.6 ANÁLISIS ECONÓMICO

En los siguientes tres cuadros, se presentan datos que redundan en el costo de los diferentes tratamientos evaluados en el presente estudio de la siguiente manera:

CUADRO 26: Datos de milímetros aplicados, promedio infiltración básica y milímetros excedidos para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

Tratamientos	mm Aplic/h	Promedio P. IB del suelo	mm Excedidos	Mm Excedidos en %
15%	31.68	12.54	19.12	60%
25%	15.87	12.54	3.31	21%
35%	13.71	12.54	1.15	8%
45%	10.68	12.54	-1.88	-18%

En el cuadro 26 se observa la relación entre mm/h aplicados, promedio ponderado de infiltración básica del suelo y los mm excedidos también expresados en porcentaje, esto nos lleva a la

determinación de la mejor velocidad en la que el pivote debe operar para mejores beneficios económicos.

CUADRO 27: Datos de costos de riegos/ha, área total pivote, número de riegos, costo total de riegos, pérdida en quetzales y por ha para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu.

Tratamientos	costo riego/ha	Área total pivote (ha)	# de riegos	Costo total (Q)	Perdida (Q)	Perdia/ha (Q)
15%	255.20	177.28	10.14	458,752.42	275,251.45	1552.64
25%	179.72	177.28	16.82	535,884.96	112,535.84	634.79
35%	134.79	177.28	23.43	559,859.60	44,788.77	252.64
45%	109.09	177.28	30.21	584,245.55	0.00	0.00

En el cuadro anterior se describe el costo del riego por hectárea y por velocidad, las hectáreas totales que riego el pivote, el número de riegos evaluados, los costos totales de riego, las pérdidas motearías según tratamiento y la pérdidas por hectárea, todos estos datos basados en el promedio ponderado de infiltración básica del suelo.

CUADRO 28: Datos de mm aplicados/hora, mm excedidos, frecuencia de riego por tratamiento, mm aplicados/día, mm reales utilizados y mm reales aplicados/día, para cuatro velocidades del pivote central fijo utilizado en riego de Caña de Azúcar, Finca Alaska, Caballo Blanco, Retalhuleu

Tratamientos	Mm aplic/h	Mm excedidos	Frecuencia de riego (días)	Mm aplicados/día	Mm reales utilizados	Mm reales aplicados/día
15%	31.68	19.12	7.00	4.53	12.54	1.79
25%	15.87	3.31	4.22	3.76	12.54	2.98
35%	13.71	1.15	3.03	4.53	12.54	4.15
45%	12.56	0.00	2.35	5.36	12.54	5.36

En el cuadro 28, se puede ver que en el tratamiento 15 % existen más milímetros excedidos (19.12) caso contrario en el tratamiento 45 %, donde no existe excedente de agua tomando en cuenta el promedio ponderado de infiltración básica (12.56), así mismo se determina que en esta velocidad se alcanza aplicar en promedio 5.36 mm de agua por día al cultivo.

## VIII. CONCLUSIONES

- ✓ El promedio general de infiltración básica ponderado obtenido en todo el experimento fue de 12.56 mm/h, relacionado con la intensidad de aplicación de riego, en velocidad de 45 %, se riega adecuadamente y esto equivale al 50 % del área cubierta por el pivote.
- ✓ Según el análisis estadístico, si hubo diferencia significativa entre las diferentes velocidades del equipo de riego, en relación al coeficiente de uniformidad, sin embargo los resultados obtenidos fueron de 82.3% y 88.2%; ambas situados entre el rango estándar (82 – 88%), establecido para el sistema de riego pivote central fijo.
- ✓ Si existió diferencia estadística significativa para la Intensidad de aplicación y escorrentía en todos los tratamientos.
- ✓ La velocidad al 45%, produjo el menor volumen de escorrentía, 6,063.29 m<sup>3</sup>, y la menor tasa de erosión 0.67 T/Ha/época de riego, considerando 30.21 eventos de riego con esta velocidad.
- ✓ Se rechaza la hipótesis debido a que no existe diferencia significativa entre los cuatro tratamientos evaluados de acuerdo a las variables de respuesta establecidas en la investigación, velocidad de infiltración y erosión del suelo, sin embargo en la velocidad de 15 % se tiene una erosión considerablemente alta ( 17.07 ton) y según autores citados en el documento lo permisible es 10 ton de pérdida de suelo por año).
- ✓ La velocidad 45 % es donde más se aprovecha el recurso agua, con una disponibilidad de 5.36 mm/día, no ocasionando pérdidas económicas en un mal uso de la misma.

## **IX. RECOMENDACIONES**

- ✓ Se recomienda que la velocidad del Pivote Central fijo, cuando se utilice en el cultivo de Caña de Azúcar, debe ser de 35 equivalente a una rotación de 65 m/h, para las características de suelo de finca Alaska Caballo Blanco, ya que es el tratamientos que mostraron generar la menor erosión del suelo, la menor pérdida de agua y la menor pérdida económica ya que se usa un menor número de riegos.
- ✓ Realizar evaluaciones de uniformidad durante el periodo de riego, porque puede ser afectada por diversos factores e incidir en un riego eficiente.
- ✓ Realizar evaluaciones de escorrentía en todas las etapas fenológicas del cultivo, con el fin de determinar si esta existe por la compactación que se ocasiona en el manejo del cultivo en este tipo de suelos (arcilloso, ver anexo).
- ✓ Implementar un estudio similar al presente, en suelos arcillosos según manejo de suelo y su efecto en la infiltración básica.
- ✓ Desarrollar nuevas tecnologías que permitan un mejor desplazamiento de los pivotes central fijo, ya que estos son altamente susceptibles a altas velocidades en superficies con topografía pronunciada.

## X. BIBLIOGRAFÍA

AgroEs.es en línea. <http://www.agroes.es/agricultura/agua-riegos-regadios/318-perdidas-de-agua-en-el-suelo-agricultura>

Allen et, (2000) en línea <http://www.monografias.com/trabajos101/tecnologias-disponibles-realizacion-del-riego-mecanizado-cuba-parte-ii/tecnologias-disponibles-realizacion-del-riego-mecanizado-cuba-parte-ii.shtml>

ASAZGUA (Asociación de Azucareros de Guatemala, GT). 2014. Cifras de producción (en línea). Guatemala. Consultado 20 Sep 2014. Disponible en: <http://www.azucar.com.gt/03cifras.htm>

BANGUAT (Banco de Guatemala, GT). 2014. Cifras de producción. Guatemala. Disponible en: <http://www.banguat.gob.gt/>

Barnéond Azurdia, JF. 2011. Análisis de la operación del riego por aspersión en caña de azúcar (Sacharum spp.), con fines de mejoras técnicas y económicas; ingenio Magdalena, S.A., La Democracia, Escuintla. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 132 p.

CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación de la Caña de Azúcar, GT). 2010. Memoria: presentación de resultados de investigación, zafra 2004-2005. Guatemala. 185 p.

CENGICAÑA, LOS SISTEMAS DE RIEGO “PIVOTE” EN LA ZONA CAÑERA GUATEMALTECA en línea. <https://cengicana.org/files/20170102122742384.pdf>

Castro O, 2010 Recomendaciones técnicas y económicas para la programación del riego en la zona cañera guatemalteca. VII Congreso de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y el Caribe. Presentación en Power Point.

CIDIAT (Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras, VE). 1986. Manual de riego por aspersión. Venezuela. 135 p.

Daza M, OH. 1986. Métodos de riego en el cultivo de la caña de azúcar. Cali, Colombia, TECNICAÑA. 281 p.

Departamento de ingeniería y manejo del agua, en línea en: <https://es.slideshare.net/WRMONROY/conceptos-bsicos-riego>

Doorenbos y Kassam 1988. Yield response to water. FAO. Irrigation y drenajes.

Escalante S. 2005. La medición de sedimentos en México. IMTA-UJAT, Tabasco, México. P 318.

EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA DE LA ACTIVIDAD DEL RIEGO ALCANZADO EN LA ZAFRA 2014/15 ZONA CAÑERA GUATEMALTECA en línea <https://cengicana.org/files/20161215175917778.pdf>

Esquit V. 2004. Conociendo el cultivo de caña en el ingenio Pantaleón, Escuintla, Guatemala (entrevista). Escuintla, Guatemala, Ingenio Pantaleón.

FERNÁNDEZ, P.C.; LUQUE, J.A.; Paloni, J.D. 1971. Análisis de la Infiltración y su aplicación para diseños de riego en el valle inferior del Río Colorado. Ministerio de Agricultura y Ganadería del Nación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Suelos – publicación N° 130. GAVANDE SA. 1 972. Física de Suelos. Principios y Aplicaciones. Ed. Limusa Wiley. p 199– 232

FONAIAP. Revista de difusión de tecnología agrícola y pesquera. La ciencia y tecnología agrícola. 1986

Gonzales, P. 2007. Introducción al riego y drenaje. Investigaciones del Riego y Drenaje. Cuba. p. 134

King B.; Bjerneberg D. 2007. Center Pivote Simulator for Evaluating System Design and Management Effect on Infiltration and Erosion. Irrigationassociation, San Diego, EEUU. p. 153-185.

Keller, i. And bliesner, R. D. Sprinkle and trickle irrigation, Chapman and Hall, New York, 1990.

Montero, J.J. M.tarjuelo; J.I.Tebar; F. Lozano y F. T. 1997. Honrubia. Analisis de la distribución del agua en riego con equipos pivote. XV congreso Nacional de Riegos y Drenajes, Madrid España.

Melgar M, Meneses A, Orozco H, Perez O, Espinoza R. 2012. El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala.CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, GT). Artemis Edinter. Guatemala. p. 177.

Nuñes Solís 2001 en línea en: <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesiseortiz/2015/06/17/Nelson-Juan.pdf>

PORTAL DE ESTADISTICA 2014 en línea en: <https://es.statista.com/estadisticas/600193/ranking-mundial-de-productores-de-cana-de-azucar/>.

Rivera Trejo. Segundo Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas, México 2005.

Rodes R.; Alemán C. 2005. Filosofía de manejo del agua en los pivotes centrales; Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias Vol. 14, num 3. Universidad Agraria Fructuoso Rodríguez, La Habana Cuba. p. 14-16.



Tarjuelo R. 2005. Utilización y manejo de los pivotes eléctricos. Consultado el 20 de Septiembre 2014. Disponible en: <http://www.redagricola.com/reportajes/riego/pivotes-la-revolucion-circular-del-riego>.

Uribe H. C., Lagos I.o, Holzaphel E. Pivote central Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA . CARILLANCA. pp 01-13, 2001.

## ANEXO

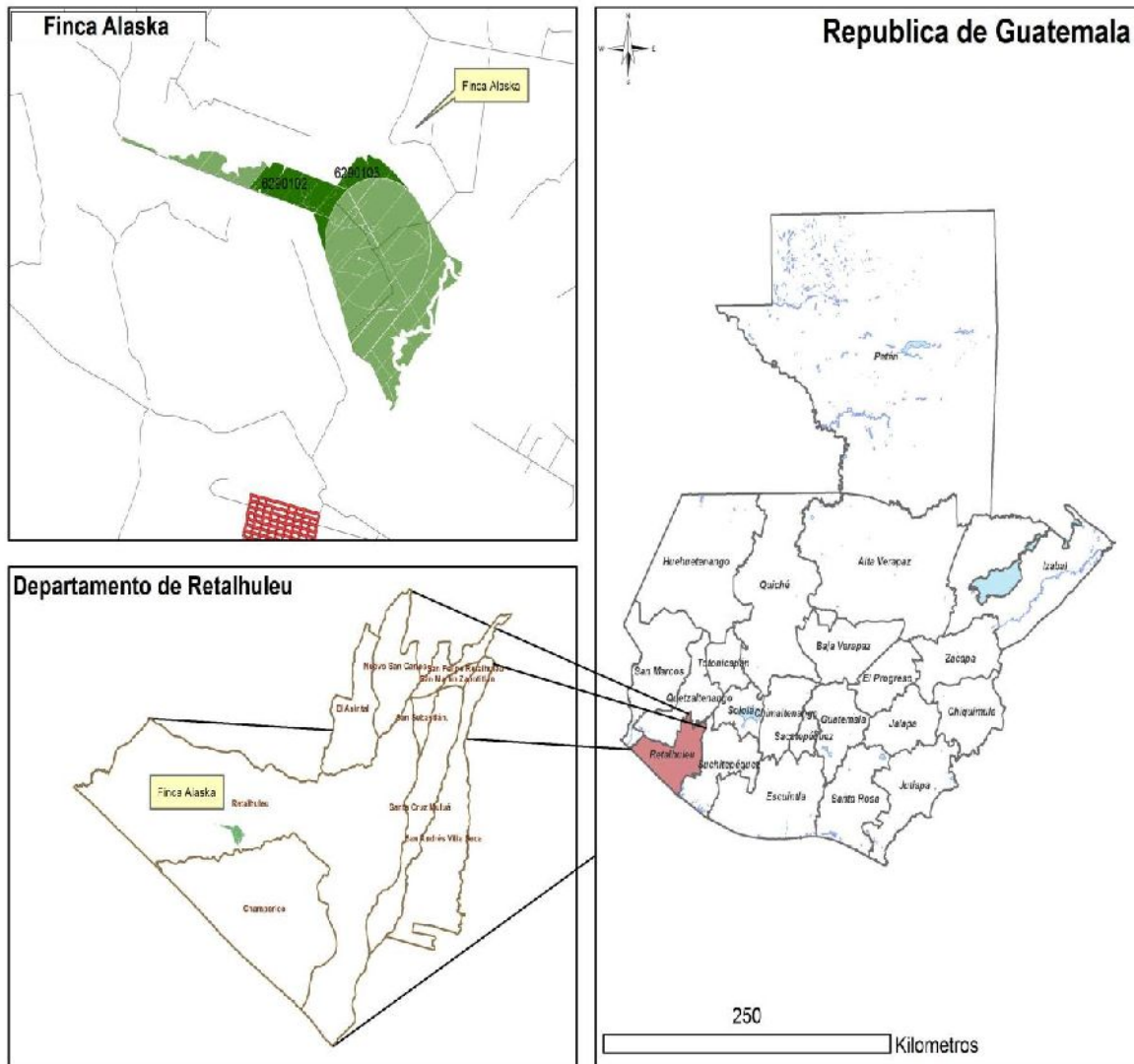


Figura 6. Mapa ubicación de la evaluación. Fuente: autor



Figura 7. Generador, base y computadora de pivote. Fuente: autor

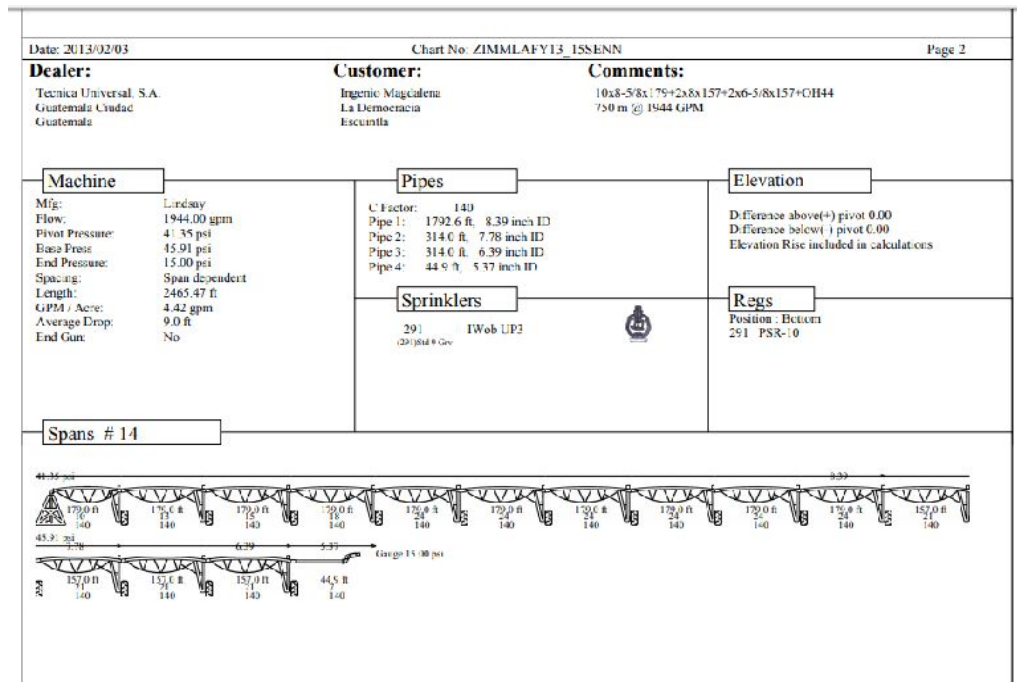


Figura 8. Estructura de pivote central fijo



Figura 9. Método doble cilindro para medición de infiltración básica del suelo.  
Fuente: autor



Figura 10. Medición infiltración básica del suelo. Fuente: autor



Figura 11. Medición uniformidad de aplicación de riego. Fuente: autor



Figura 12. Medición intensidad de aplicación. Fuente: autor



Figura 13. Visualización intensidad de aplicación. Fuente. Autor

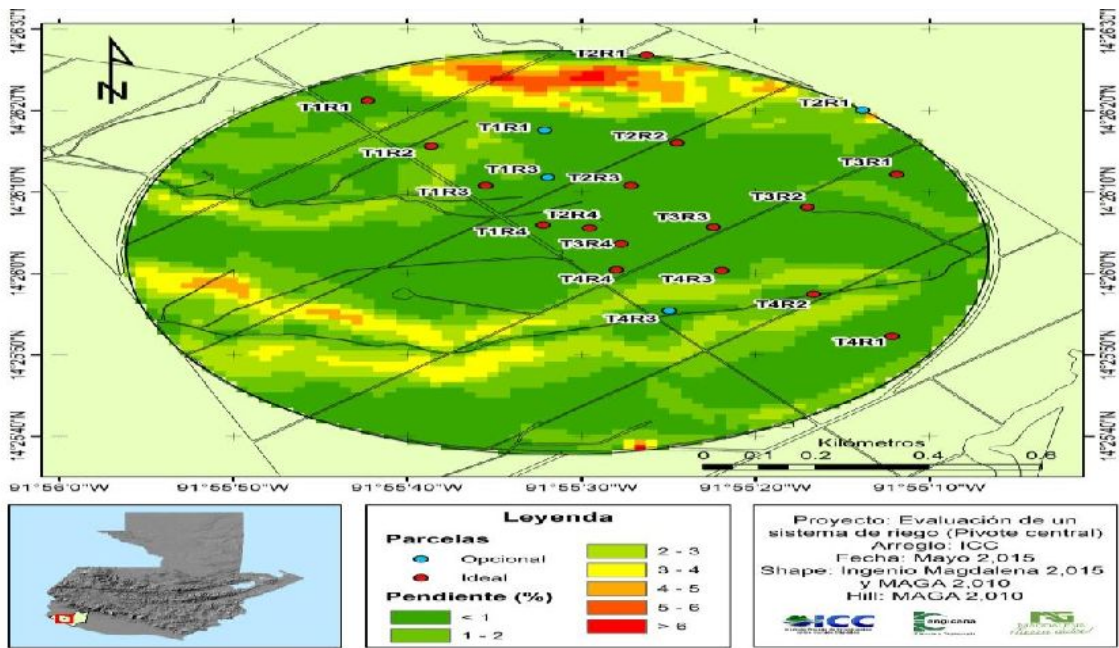


Figura 14: Ubicación parcelas de escorrentía y erosión en finca Alaska.



Figura 15. Parcela de escorrentía. Fuente: autor



Figura 16. Colectores de agua escorrentía. Fuente: autor



Figura 17. Evento de riego en parcelas de escorrentía y erosión. Fuente: autor



Figura. 18 Colectores de agua de escorrentía y erosión. Fuente: autor





Figura. 19. Medición del agua de escorrentía y extracción de muestra para calcular la erosión. Fuente: autor



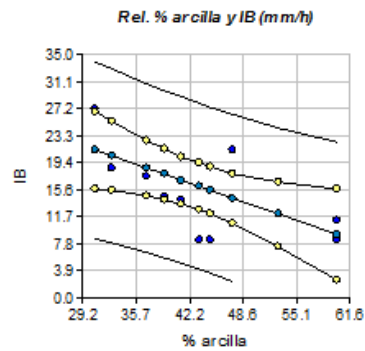
Figura. 20. Proceso para cálculo de la erosión del suelo. Fuente: autor



Figura. 21. Horno de Secado del suelo para cálculo de la erosión. Fuente autor:

IDENTIFICACION		% M.O	Gr/cc Da	% HUMEDAD		% Arcilla Limo Arena			CLASE TEXTURAL
				1/3	15				
M-1	1ª RODADA DEL PIVOTE 20	3.82	1.1111	25.31	15.64	30.70	35.32	33.98	FRANCO ARCILLOSO
M-2	1ª RODADA DEL PIVOTE 40	3.51	1.0811	26.37	16.40	32.80	33.22	33.98	FRANCO ARCILLOSO
M-3	1ª RODADA DEL PIVOTE 60	2.64	1.1111	26.36	28.75	47.50	24.82	27.68	ARCILLOSO
M-4	2ª RODADA DEL PIVOTE 20	3.18	1.0811	23.50	15.78	32.80	29.02	38.18	FRANCO ARCILLOSO
M-5	2ª RODADA DEL PIVOTE 40	3.07	1.1765	26.68	17.20	37.00	29.02	33.98	FRANCO ARCILLOSO
M-6	2ª RODADA DEL PIVOTE 60	2.20	1.0526	28.24	21.23	53.80	22.72	23.48	ARCILLOSO
M-7	3ª RODADA DEL PIVOTE 20	3.18	1.0526	24.48	16.78	39.10	26.92	33.98	FRANCO ARCILLOSO
M-8	3ª RODADA DEL PIVOTE 40	3.07	1.0811	25.63	17.03	41.20	29.02	29.78	ARCILLOSO
M-9	3ª RODADA DEL PIVOTE 60	1.65	1.0526	29.12	21.43	60.10	18.52	21.38	ARCILLOSO
M-10	4ª RODADA DEL PIVOTE 20	2.89	1.1429	23.24	16.08	43.30	24.80	31.88	ARCILLOSO
M-11	4ª RODADA DEL PIVOTE 40	2.45	1.1832	24.07	16.16	44.70	21.72	33.58	ARCILLOSO
M-12	4ª RODADA DEL PIVOTE 60	1.56	1.0256	30.28	21.90	60.10	18.52	21.38	ARCILLOSO

Figura 22. Análisis físico de área evaluada finca Alaska. Fuente. Autor



**Análisis de regresión lineal**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
IB	12	0.42	0.36	35.69	77.26	78.72

**Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	34.04	6.88	18.71	49.38	4.95	0.0006		
% arcilla	-0.41	0.15	-0.76	-0.07	-2.69	0.0228	7.65	

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	192.42	1	192.42	7.22	0.0228
% arcilla	192.42	1	192.42	7.22	0.0228
Error	266.61	10	26.66		
Total	459.03	11			

1

Figura 23. Relación % de arcilla e infiltración básica. Fuente. Autor