

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



**COMPORTAMIENTO DEL PERFIL DE HUMEDAD EN UN SUELO BAJO RIEGO**

**DE PIVOTE CENTRAL CON VIENTOS MAYORES A 16 KPH.**

**POR**

**LUIS MIGUEL LÓPEZ DÍAZ**

**TESIS**

Presentado como requisito para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Junio del 2019

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**

**COMPORTAMIENTO DEL PERFIL DE HUMEDAD EN UN SUELO BAJO RIEGO DE  
PIVOTE CENTRAL CON VIENTOS MAYORES A 16 KPH.**

**POR:**

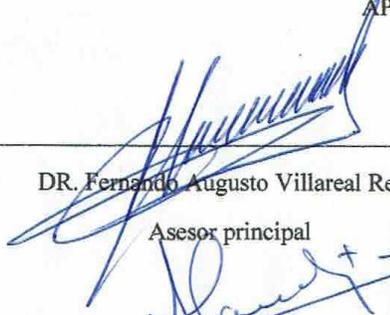
**LUIS MIGUEL LÓPEZ DÍAZ**

Que se somete a la consideración de H. Jurado Examinador como Requisito Parcial

Presentado para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

APROVADA POR:

  
DR. Fernando Augusto Villareal Reyna

Asesor principal

  
M.C Luis Rodríguez Gutiérrez

Coasesor

  
Ing. José Enrique Mandujano Álvarez

Coasesor

  
M.C Tomas Reyna Cepeda

Coasesor



  
M.C Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de división de Ingeniería

Buenavista. Saltillo. Coahuila. México.

Junio 2019

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que nada, agradecimiento a mi **padre Dios** por darme la fortaleza de poder terminar mis estudios y que siempre me mantuvo con salud y sabiduría para enfrentar las situaciones difíciles que se presentaron frente a mí, así mismo por llevarme por buen camino hasta mi meta.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por todo el apoyo que me brindo tanto en lo económico y profesional, como en mi formación como persona. Las experiencias inolvidables que en ella viví, quedan grabadas en mí por siempre

A mis maestros en general que como docentes nos formaron siempre con el objetivo de que los conocimientos de ellos nos quedaran bien claros y grabados. Siempre enfocados a dar la educación relacionada a lo que se vive en el campo y aplicaciones tanto laborales como a lo que se maneja en el campo de la carrera.

Al **M.C. Francisco Torres Aguirre** por su apoyo económico y técnico y por compartir los conocimientos teóricos y prácticos, ya que me brindó la oportunidad de aplicar al ámbito laboral lo aprendido en el aula.

Al **Dr. Fernando Augusto Villareal Reyna** por compartir sus conocimientos teóricos y prácticos, así como su experiencia y herencia técnica que nos deja como profesionistas, por guiar mi participación en este proyecto de investigación de tesis.

Al **Dr. Javier de Jesús Cortes Bracho** por los consejos y apoyo que me brindo siempre que lo necesité

A los **asesores** que me apoyaron como maestros en el aula, así como en el trascurso de la escritura de la tesis y por sus consejos en la redacción final del documento.

M. C. Luis Rodríguez Gutiérrez

M.C. Tomas Reyna Cepeda

Ing. José Enrique Mandujano Álvarez

Dra. Rosa Elvira Valdez Ramos

A todo el personal que labora en la UAAAN que me apoyó en las diversas circunstancias que se me presentaron durante mi estancia en la universidad como estudiante y gracias por brindarme los consejos necesarios en tomar las decisiones correctas

## DEDICATORIAS

A mí esposa **Brenda Yesenia Hinojoza Moreno** y a mi hija **Wendy Yatzari López Hinojoza** que siempre me han apoyado incondicionalmente en todo, me acompañaron y entendieron en cada momento de presión, me dieron ánimo para seguir adelante y cumplir las metas que requieren los estudios profesionales.

A mis padres **Ma. Del Consuelo Díaz Escobedo, Francisco López Salmerón**, a quien siempre tuve presentes y que me guiaron y educaron desde pequeño con el propósito de ver el futuro con la mentalidad de una persona llena de grandes ambiciones a base del trabajo.

A mis **hermanos Ma. Isabel, Martha Cecilia, Ma. Del consuelo, Roxana, Ma. Teresa, Ma. De Jesús, Francisco, Arcadio, José Oscar Manuel**), por el apoyo que me brindaron tanto en lo económico como en lo sentimental porque siempre conté con ellos para lo que se me ofreciera. Que siempre me dieron un consejo para así seguir por el buen camino.

Con especial agradecimiento a mi hermano **José Oscar Manuel López Díaz**, que siempre estuvo al pendiente de darme su apoyo y aún sigue haciendo, todo mi agradecimiento para ti hermano.

A todas las personas que me apoyaron a lo largo de mi estancia tanto aquí en la universidad como fuera de ella.

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.	OBJETIVOS.....	3
1.3.	HIPÓTESIS:.....	3
1.4.	JUSTIFICACIÓN.....	4
2.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1.	ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	5
2.2.	PIVOTES CENTRALES.....	8
2.3.	UNIFORMIDAD DEL RIEGO.....	10
2.4.	COEFICIENTES DE UNIFORMIDAD.....	11
2.5.	CARACTERÍSTICAS DEL RIEGO POR ASPERSIÓN (PIVOTE CENTRAL)	
	12	
2.6.	EVALUACIÓN TÉCNICA DE UN PIVOTE CENTRAL.....	13
2.7.	COMPONENTES Y DESCRIPCIÓN DEL PIVOTE CENTRAL.....	14
2.7.1.	PIVOTE CENTRAL FIJO.....	14
2.7.2.	PUNTO PIVOTE.....	14
2.7.3.	COLECTOR DE ANILLO ROZANTES.....	17
2.7.4.	LATERAL.....	19
2.7.5.	TUBERÍA PORTA EMISORES.....	20
2.7.6.	ALINEAMIENTOS.....	21

2.7.7. CUELLOS DE GANSO .....	21
2.7.8. COLGANTE .....	22
2.7.9. ADAPTADORES.....	24
2.7.10. CONTRAPESOS .....	24
2.7.11. REGULADORES DE PRESIÓN .....	25
2.7.12. FUNCIÓN DE LOS REGULADORES DE PRESIÓN.....	26
2.7.13. ROCIADORES O EMISORES .....	28
2.7.14. ASPERSORES NELSON IRRIGATION.....	30
2.7.15. SISTEMA DE PROPULSIÓN.....	32
2.7.16. SISTEMA ELÉCTRICO.....	33
3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PIVOTE CENTRAL .....	33
3.1. VENTAJAS .....	33
3.2. DESVENTAJAS .....	34
4. VELOCIDAD DEL VIENTO .....	34
4.1. COMO SOLUCIONAR ESTOS EFECTOS .....	36
5. CONTENIDO DE HUMEDAD.....	37
6. VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN.....	37
7. EL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE LOS SISTEMAS POR ASPERSIÓN (CHRISTIANSEN) .....	39
8. TAZA DE PRECIPITACIÓN O PLUVIOMETRÍA .....	41

9.	CILINDROS INFILTRÓMETROS .....	43
10.	MÉTODOS Y MATERIALES .....	44
10.1.	LOCALIZACIÓN DE PROYECTO.....	44
10.2.	EL ÁREA DEL PIVOTE.....	46
10.3.	VELOCIDAD DE AVANCE .....	46
11.	MÉTODO.....	47
11.1.	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (CILINDROS INFILTRÓMETROS) .....	48
11.2.	CONTENIDO DE HUMEDAD (LABORATORIO Y CAMPO).....	49
11.3.	GASTO POR UNIDAD DE EMISOR (COLECTOR EN EMISOR).....	50
11.4.	PLUVIOMETRÍA EN PUNTO SUELO (COLECTORES).....	50
11.5.	VELOCIDAD DEL VIENTO.....	51
12.	MATERIALES.....	51
12.1.	DESCRIPCIÓN POR VARIABLE DE PROCEDIMIENTO.....	51
12.1.1.	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN .....	51
12.1.2.	CONTENIDO DE HUMEDAD PW.....	51
12.1.3.	GASTO POR UNIDAD DE EMISOR.....	52
12.1.4.	PLUVIOMETRÍA EN PUNTO PISO .....	52
12.1.5.	VELOCIDAD DEL VIENTO.....	52
13.	METODOLOGÍA.....	53
14.	RESULTADOS.....	54

14.1.	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN .....	54
14.2.	INFILTRACIÓN CUMULADA.....	57
14.3.	CÁLCULO DE LA TAZA DE PRECIPITACIÓN EN mm.....	58
14.4.	CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE CHRISTIANSEN	61
14.5.	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE APLICACIÓN (Ea) Y EFICIENCIA DE REQUERIMIENTO (Er).....	63
14.6.	GRÁFICAS A DIFERENTES VELOCIDADES .....	67
14.6.1.	GRÁFICAS A 10 KPH.....	67
14.6.2.	GRÁFICAS A 15 KPH.....	68
14.6.3.	GRÁFICAS A 20 KPH.....	69
14.6.4.	GRÁFICAS A 25 KPH.....	70
15.	CONCLUSIONES.....	75
16.	RECOMENDACIONES .....	76
17.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS.....	76
18.	ANEXOS .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Línea del tiempo o evolución del pivote central a partir del año 1878 hasta la fecha actual 2019 .....	7
Figura 2. Esquema o esqueleto de un pivote central. ....	9
Figura 3. Distribución de medidas según el radio del pivote para cada 25 %. ....	13
Figura 4. Centro pivote (soporte de movimientos bruscos).....	15
Figura 5. Gabinete de control ubicado en punto pivote. ....	17
Figura 6. Anillo que permite el (giro y porta corriente).....	18
Figura 7. Sistema de propulsión con motor en torre.....	19
Figura 8. Sistema de tubería y triangulación porta emisores.....	20
Figura 9. Sistema de alineamiento de cada torre. ....	21
Figura 10. Cuellos de ganso con niple en su punta de conexión. ....	22
Figura 11. Manguera para colgante y tipos de colgantes.....	23
Figura 12. Conexiones de cuello de ganso a bajante (hembras inser y machos inser). .....	24
Figura 13. Contrapeso para evitar el movimiento de los bajantes por efecto del viento. .....	24
Figura 14. Diferentes tipos de reguladores (presión, salidas y marca).....	27
Figura 15. Distribución del agua de acuerdo a la topografía con o sin reguladores. .	27
Figura 16. Diferentes tipos de difusores o emisores utilizados en pivotes centrales.	29
Figura 17. Características de los aspersores utilizados en el pivote central. ....	30
Figura 18. Curvas de infiltración según los aspersores de Nelson Irrigation.....	30
Figura 19. Gama de tipo de boquillas Senninger para aspersores o emisores. ....	31

Figura 20. Cañones finales para pivotes centrales.....	31
Figura 21. Sistema de propulsión neumática. ....	32
Figura 22. Comportamiento de la velocidad de infiltración y la infiltración acumulada. .....	38
Figura 23. Valores de infiltración en mm/h, según la textura del suelo. ....	39
Figura 24. Diferentes escenarios de la distribución del agua aportada por un equipo bajo riego.....	41
Figura 25. Aplicación de la pluviometría en el suelo bajo riego.....	42
Figura 26. Localización y perfil del pivote central de evaluación.....	44
Figura 27. Localización del área de estudio. ....	45

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de los datos de campo de la velocidad de infiltración.....	55
Tabla 3. Datos recabados para el gráfico de la pluviometría 5 kph.....	59
Tabla 4. Datos para el cálculo del CUC 5 kph.....	62
Tabla 5. Datos recabados de Pw con el método gravimétrico.....	64
Tabla 6. Datos de prueba a 10 kph .....	79
Tabla 7. Datos para el cálculo del CUC 10 kph.....	80
Tabla 8. Datos recabados de Pw con el método gravimétrico 10 kph .....	81
Tabla 9. Datos recabados para el gráfico de la pluviometría 15 kph.....	82
Tabla 10. Datos para el cálculo del CUC 15 kph.....	83
Tabla 11. Datos cálculo Pw con el método gravimétrico 15 kph.....	84
Tabla 12. Datos recabados para el gráfico de la pluviometría 20 kph.....	85

Tabla 13. Datos para el cálculo del CUC 20 kph.....	86
Tabla 14. Datos para el cálculo del gráfico de la pluviometría 26 kph.....	87
Tabla 15. Datos para el cálculo del CUC 26 kph.....	88
Tabla 16. Datos cálculo $P_w$ con el método gravimétrico 26 kph.....	89

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2. Curva de velocidad de infiltración acumulada.....	57
Gráfico 3. Curva de comportamiento de pluviometría a 5 kph. ....	60
Gráfico 4. Curva de contenido de humedad y requerimiento de la planta.....	66
Gráfico 5. Curva de comportamiento de pluviometría a 10 kph.....	67
Gráfico 6. Curva de contenido de humedad y requerimiento de la planta.....	67
Gráfico 7. Curva de comportamiento de pluviometría a 15 kph.....	68
Gráfico 8. Curva de contenido de humedad y requerimiento de la planta.....	68
Gráfico 9. Curva de comportamiento de pluviometría a 20 kph.....	69
Gráfico 10. Curva de contenido de humedad y requerimiento de la planta.....	69
Gráfico 11. Curva de comportamiento de pluviometría a 26 kph.....	70
Gráfico 12. Curva de contenido de humedad y requerimiento de la planta.....	70
Gráfico 13. Comparación de las láminas de pluviometría en mm .....	72
Gráfico 14. Diferentes láminas del testigo a comparación de velocidad máxima. ....	72
Gráfico 15. Comportamiento de $P_w$ a diferentes velocidades del viento.....	73
Gráfico 16. Comportamiento del pivote cuando el requerimiento $P_w$ es de 9.36 Kohms. .....	73

## RESUMEN

Se exponen los resultados obtenidos de la evaluación de la máquina de pivote central. El objetivo de este estudio fue evaluar desde el punto de vista técnico y económico un sistema de riego por pivote central, ubicado en la zona de San Antonio de las Alazanas municipios de Arteaga Coahuila México.

La evaluación de este método consiste en observar el porciento de variación en el riego con respecto a la variación del viento (CUC/kph).

En este proyecto se van a evaluar las diferentes variables para saber su comportamiento como sistema de riego hidráulico (velocidad del viento, pluviometría en el punto piso, gasto del emisor o aspersor en boquilla, velocidad de infiltración y contenido de humedad), ya que son las variantes más importantes en la evaluación de estos mismos sistemas.

Los resultados que obtuvimos nos permitieron concluir que los parámetros de funcionamiento del equipo evaluado, se encuentran con un mal funcionamiento a causa de diferentes variantes como (viento, clima, relieve, y contenidos del agua al igual, mal diseño), en el cual los efectos del viento sobre la aplicación de agua al punto cultivo.

Se utiliza la ecuación de **CUC (Coeficiente de Uniformidad de Christiansen)**, ya que es la metodología que más se utiliza en sector agrícola de riego y que estadística mente representa la desviación media estándar de los valores promedio de las precipitaciones.

Con esto se puede evaluar el perfil del comportamiento hidráulico a lo largo de la línea de riego, así como los valores del gasto residual (gasto recibido en los botes del suelo)

y, es una clara visión estadística entre el gasto descargado hidráulicamente en base a una presión unitaria contra un receptor.

El factor más importante de este método es realizar la prueba cuando se tiene una tendencia de velocidad de viento, para la cual se utiliza un anemómetro digital, que grafica la velocidad promedio que se presentó durante la prueba.

Los datos los llevo a una base de datos donde el testigo es velocidades por debajo de 5 km/h y el crítico se ha presentado velocidades por encima de 16 o más kph.

El viento es un factor que afecta también a lo que es la  $E_a$  y  $E_r$ , que también se evaluaron con respecto a un contenido de humedad requerido por la planta y el contenido de humedad que se aplicó según la velocidad del viento en la zona.

También se llevó a cabo lo que es la velocidad de infiltración con el método de los cilindros infiltrómetros, para saber la cantidad de agua que puede retener ese tipo de suelo hasta tener una variación de cargas del 10 %, en su variación de cargas a lo que llamaremos infiltración básica, con el fin de ahorrar tiempo, agua, energía, dinero y erosión en el suelo.

**Palabras clave:** contenido de humedad, pluviometría, velocidad y dirección del viento, gasto del emisor, infiltración, presión de operación.

## 1. INTRODUCCIÓN

El viento es uno de los factores más condicionantes del riego por aspersión. Las gotas de lluvia que simula el método son arrastradas fácilmente por este, lo que impide una buena uniformidad de aplicación. Tanto la distribución del agua de los aspersores como su disposición en el campo están sujetos a la interacción con el viento, siendo éste el principal distorsionador de la uniformidad de riego.

La relación entre el gasto descargado de una boquilla y el gasto real depositado en el suelo depende directamente del tamaño de gota y la velocidad del viento, ya que al someter este flujo a la atmosfera real mente se tiene una perdida que debe de ser tolerable, ya que este es inevitable.

El principal efecto del viento sobre el riego con sistemas pivotes es el cambio de superficie mojada que se presenta cuando el viento sopla en el mismo sentido que la dirección longitudinal de la máquina. Así, cuando el viento sopla hacia la cabeza o centro del Pívor, el área mojada disminuye alrededor de un 17%, mientras que cuando sopla hacia el voladizo o alero, el área mojada crece alrededor de un 19%.

El pivote central, corresponde a uno de los equipos de mayor nivel tecnológico en la aplicación del agua mediante aspersión a los cultivos, con grandes ventajas que han incentivado su adopción durante los últimos 35 años en México. La eficiencia de aplicación de los recursos del agua al suelo y cultivo es hoy una de las principales variables que determinan el grado de explotación de un proyecto agrícola.

Los sistemas de riego por aspersión tipo pivote central donde la tubería se divide en tramos, que son soportados por un número variable de torres automotrices que se

desplazan en círculo sobre el terreno, alrededor del punto fijo denominado punto pivote (Martínez, Sánchez y Serrano, 2001). Este último integra el tablero de comando, la interconexión hidráulica proveniente del sistema de impulsión y las de suministro eléctrico que permite el accionamiento de toda unidad. Creado en 1948 por Frank Zybach en los Estados Unidos y patentado en 1952 (Uribe, Lagos y Holzapfel, 2001).

Al clasificarse este sistema como un equipo hidráulico-electro-mecánico con movimiento independiente, genera polémica sobre su real eficiencia, ya que si no está calibrado al fenómeno integral ASPA (Agua, Suelo, Planta, Atmosfera), esta forma de irrigar más que beneficiar perjudica tanto al agricultor, ya que sus costos podrían rebasar el marco económico del proyecto.

Esto significa que la acción de irrigar debe de cumplir con los requerimientos de humedad del suelo (Humedad aprovechable), su propiedad física mecánica del suelo (Velocidad de Infiltración), que determina la tasa de precipitación que puede recibir sin antes generar aspectos como el encharcamiento, saturación, percolación profunda, o exponer el fluido por demasiado tiempo contra el viento y la evaporación, el uso consuntivo del cultivo, y el coeficiente de deflexión del suelo determinan la lámina de riego en base a la eficiencia según la zona climatológica, todo en conjunto determinan las horas bombeo de cierto caballaje de las bombas y en si la capacidad del sistema eléctrico en KVA y por ultimo lo más importante el consumo de KWH, determinando la viabilidad económica del proyecto.

Todo proyecto agrícola en riego lo podemos determinar en dos líneas:

Costo del proyecto inicial

Costo de la operación del sistema

Un punto de vista muy importante a tomar es el tipo de proyecto que se realizara ejemplo: cuando se tiene en mente que el proyecto va a perdurar por varios años, este se hace con mayor costo al inicio y menor costo de operación, ya que todos los casos, los costos son más mayores en lo que son la energía eléctrica, a causa de los motores o las bombas sumergibles que se utilizan en su operación.

Este escenario solo lo decide el dueño en la compra del proyecto.

### **1.1.OBJETIVO GENERAL**

Evaluar si el sistema de riego tipo pivote central cumple con la reposición de la deflexión de humedad en el suelo con vientos por encima de 16 k/h

### **1.2.OBJETIVOS**

Determinar la pérdida de la pluviometría en lo que es la distancia de la boquilla al suelo por causa de la velocidad del viento mayor a 16 kph.

Determinar la velocidad de infiltración del suelo y la taza de precipitación promedio de operación.

Indicar con graficas los comportamientos de la eficiencia de aplicación según la zona de ubicación.

Calcular el contenido de humedad para ver la uniformidad en el suelo en % de  $0w$ .

### **1.3.HIPÓTESIS:**

Dado la forma de irrigar los cultivos bajo pivote central, "**considero**" que debería de haber una diferencia del 10 % de la humedad del suelo, dada la presión de operación de las boquillas del sistema", ejercicio que no se cumple ya que velocidades del viento por encima de 16 Kph provoca una des uniformidad mayor del 30 %.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

La relación entre el gasto descargado de una boquilla y el gasto real depositado en el suelo depende directamente del tamaño de gota y la velocidad del viento, ya que al someter este flujo a la atmosfera, real mente se tiene una perdida que debe de ser tolerable, ya que este es inevitable.

La acción de irrigar tiene que ser contemplado en los costos de operación de un sistema de riego por aspersión (Índice de kwh/lps/hora), y no confundir con la forma de irrigar, esto se refiere a que dado la región, los factores climatológicos, el tipo de suelo, y la ETP del cultivo, la automatización y los sistemas más modernos deben de ser proyectados en irrigar al cultivo dependiendo de la zona radicular, su crecimiento en base a su Uso consuntivo y no irrigar bajo un por ciento de avance del pivote, generando riegos excesivos y volúmenes de agua perdidos por percolación profunda, evaporados y traslapados por la velocidad del viento, provocando un consumo excesivo de energía eléctrica.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS**

El primer intento conocido data de 1878 cuando un ingeniero francés John Winnebrenner patentó una tubería que transportaba agua que era tirada por caballos y giraba como las agujas de un reloj.

A mediados del siglo XX el concepto reapareció gracias a la visión e inteligencia de Frank Zybach, un granjero de Strasburg, Colorado, quien diseñó y ensambló un "aparato autopulsado de riego por aspersores" que puso en práctica el concepto y constituyó una alternativa práctica al tremendo esfuerzo de regar con palas y tubos (sifones) cargados a mano.

En Julio de 1952 la patente obtenida por el invento de Zybach marcó el comienzo de una revolución en la tecnología de riego. A este invento se le dio el nombre de pivote central. Un año después de que Zybach recibiera su patente se asoció con el comerciante de Columbus, Nebraska, A. E. Trowbridge. Este último se comprometió a financiar la fabricación de las máquinas en Columbus por el 49% del derecho de patente. Comenzaron a construir en 1953 pero un año después le vendieron los derechos de fabricación a Robert Daugherty.

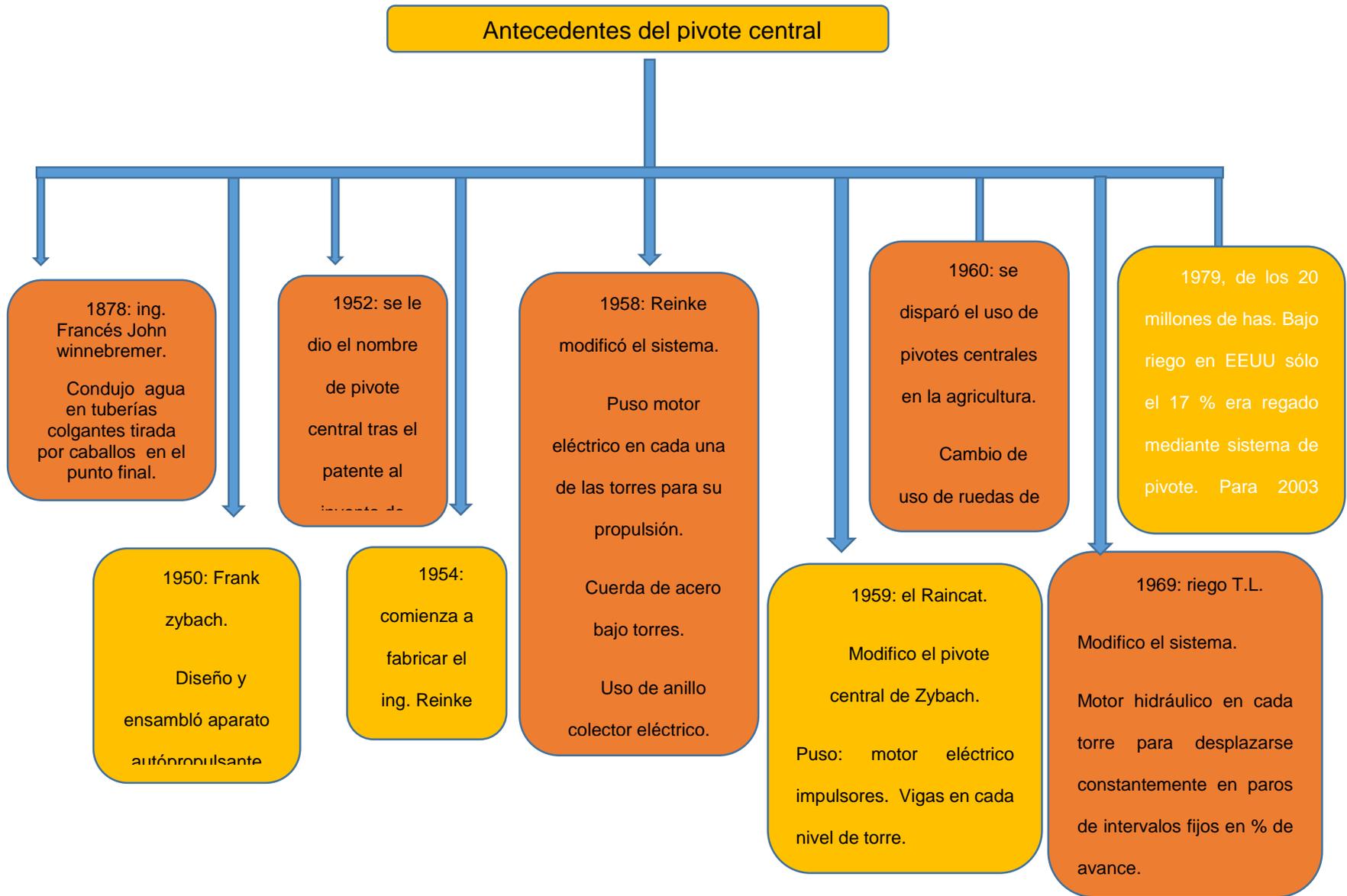
Hacia 1979, de los 20 millones de hectáreas bajo riego en EEUU sólo el 17 % era regado mediante sistema de pivote. Para 2003 este porcentaje aumentó al 51 %. En Brasil, uno de los países que lideran el riego por pivote en Latinoamérica, el área bajo riego en 2006 era de 3.4 millones de hectáreas (7.1 % del total agrícola en ese momento). El método de riego por superficie ocupaba por entonces 1.729.800 has; los pivotes centrales

710.600 has (21 % del área irrigada), la aspersión convencional 662.300 has y el riego localizado 337.800 has. (Morabito, 2015).

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.

Las máquinas de riego han llegado ya a la plenitud de su desarrollo mecánico (Tarjuelo, 1999). Ahora evolucionan hacia la mejora de la eficiencia. Los nuevos desarrollos se dirigen principalmente hacia los emisores. El objetivo es encontrar emisores que trabajen a baja presión, tengan un gran alcance y sean poco afectados por el viento.

En el mercado existe un sin número de tipos y modelos de emisores para pivotes centrales, los cuales se diferencian según el volumen aplicado en el tiempo (razón de aplicación), diámetro de mojado, presión requerida y costo. Además, tiene que aplicarse una lámina de agua de manera uniforme para satisfacer los requerimientos de riego y, a la vez, evitar la escorrentía superficial o pérdida del agua que escurre fuera del alcance de las plantas y que posteriormente repercute en el rendimiento del cultivo. Para cumplir estas metas es importante considerar la disponibilidad de flujo, tamaño del pivote central, tipo de suelo (textura y velocidad de infiltración), clima (evapotranspiración y viento) y los requerimientos de agua de los cultivos. (Pérez, L. R., Blanco, C. J. L., Piña, G.N., Pérez, G. A. G. 2010).



**Figura 1.** Línea del tiempo o evolución del pivote central a partir del año 1878 hasta la fecha actual 2019

## 2.2. PIVOTES CENTRALES

Los sistemas de pivote central riegan superficies de grandes dimensiones de forma circular. Se emplean en sitios donde el agua es un factor fuertemente limitante. También en campos donde se desea aumentar la eficiencia del riego, aprovechando mejor el agua y aumentando fuertemente los rendimientos de los cultivos. La eficiencia en el riego por pivote es de un 85% a 90%.

Es un sistema que se adapta a las ondulaciones del terreno (este no necesita ser plano). Dependiendo del fabricante y del diseño del equipo se pueden utilizar en terrenos con hasta un 30% de pendiente (T-L Irrigation).

La distribución del agua a lo largo de la estructura la realiza el fabricante seleccionando el tamaño y la separación de los aspersores. Los aspersores ubicados cerca del centro del pivote necesitan entregar menor cantidad de agua que aquellos ubicados hacia el final. Con las nuevas tecnologías en aspersores para pivotes, los fabricantes han logrado bajar aún más la presión de operación de los aspersores (hasta 6-10psi =0,42-0,7bar); y con ello, la presión de operación de los pivotes (y el consumo de energía).

Son mecánicamente muy fiables y simples de operar, aunque, como cualquier maquinaria, el mantenimiento rutinario y sistemático es imprescindible. Estos equipos permiten un notable ahorro de agua y energía al compararse con otras técnicas como la aspersión tradicional y los pivotes de accionamiento hidráulico, según menciona (Keller y Bliesner, 1990). Gracias a los pivotes centrales y laterales móviles automáticos, es relativamente fácil manejar los niveles de riego en forma adecuada según menciona (González, 2006).

La mayor proporción del mercado mundial de riego por pivote son de accionamiento eléctrico, ya que existen diversos fabricantes (Irrifrance, Chamsa, RKD, Valley, Pierce, Rokking, Reinke, Bauer, Ice Innova (Irrigation Components Europe)). El saldo es de accionamiento hidráulico fabricado por T-L Irrigation Co (Hastings, Nebraska USA)-

Los cultivos que generalmente se riegan con los sistemas de pivote central son maíz, soja, trigo, algodón, maní, papa, girasol, alfalfa, sorgo, remolacha azucarera, hortalizas, pasturas naturales, etc. También existen instalaciones de pivotes centrales donde se han reemplazado los aspersores por líneas de goteros, lo que permite regar por goteo algunos cultivos, pero a un menor costo de instalación.

La Uniformidad de Distribución, indicador de la magnitud de los problemas en el proceso de aplicación de agua y el Coeficiente de Uniformidad de Hermann y Hein. Este último, corresponde a una modificación del Coeficiente de Christiansen, donde cada pluviómetro representa una corona circular de área creciente a medida que se aleja del punto pivote (Hermann y Hein, 1968).



**Figura 2.** Esquema o esqueleto de un pivote central.

### **2.3. UNIFORMIDAD DEL RIEGO**

Es una relación que se expresa las pérdidas desde la fuente de agua hasta las plantas. Generalmente se expresa en porcentaje.

El coeficiente de uniformidad (EU) en un sistema de riego, es un parámetro fundamental en la medida de la eficiencia de nuestro sistema de riego, si el agua no se distribuye homogéneamente, habrá zonas que reciban menos cantidad de agua que otras y para compensar esta situación, el sistema tiene que estar más tiempo regando con lo que ello implica.

Una uniformidad por encima del 90% se considera magnífica, entre un 75% y un 90% es una uniformidad que permite trabajar si bien no es un valor ideal y conllevará gastos extra, por debajo del 70% no es en absoluto aconsejable. Si comparamos un sistema con una uniformidad del 75% frente a otro con una uniformidad del 85%.

Algunos investigadores indican que la afectación que tienen las bajas uniformidades de distribución del riego en los sistemas de aspersión, es de suma importancia en la afectación de los rendimientos agrícolas (Pérez et al., 2003; Buendía et al., 2004), ya que en las áreas que se riegan de manera insuficiente debido a la des uniformidad ocurre una reducción de los rendimientos agrícolas.

Actualmente el coeficiente de uniformidad de Hermann y Hein es el parámetro utilizado por la norma internacional UNE-EN ISO 11545 para evaluar la uniformidad de distribución de agua entregada por un sistema de riego tipo pivote central.

La uniformidad se deduce por la forma del patrón de aspersión, simétrico o asimétrico. En la mayoría de los aspersores, la simetría del patrón elíptico de aspersión podría

dividirse en dos mitades equivalentes, cada una imagen espejo de la otra, con excepciones de los aspersores de giro parcial. La proporción adecuada de la precipitación está en función del traslape y la armonía en la posición de las partes o puntos unos respecto de otros, y con referencia a la posición de la línea regante por donde pasa el eje de simetría. Al mover el eje de simetría cada aspersor llega a traslapar consigo mismo y los puntos de la parte izquierda encuentran posición de coincidencia con los puntos de la parte derecha. En campo se pierde la simetría de las partes debido a la distorsión del patrón de aspersión influida por el viento (dirección y velocidad) variaciones en la presión, desgaste de las boquillas y la falta de verticalidad de los aspersores o variaciones en la velocidad del giro (Moreno Ramírez Geovanny)

#### **2.4. COEFICIENTES DE UNIFORMIDAD.**

CU 80 a 90 %, < 7.5 m/s (Jensen, 1980)

CU 90 a 94 % riegos de alta frecuencia (Keller1990)

Valores altos de CU

- 1) El lateral ocupa infinitas posiciones en su recorrido, compensándose en parte las distorsiones entre riegos sucesivos.
- 2) Gran solapamiento entre emisores

<b>Sistema</b>	<b>CU (%)</b>
Laterales móviles	70 a 86 %
Aspersión fija	70 a 88 %
Laterales auto desplazables	75 a 94 %
Cañones de riego	60 a 75 %

**Cuadro 1.** Coeficiente de uniformidad.

## **2.5. CARACTERÍSTICAS DEL RIEGO POR ASPERSIÓN (PIVOTE CENTRAL)**

Indicaron (Briones y Casillas, 1986) que la tasa de precipitación a lo largo de la línea lateral en un sistema de pivote central tiene características únicas, puesto que los aspersores o emisores más alejados del punto pivote irrigarán una mayor área por unidad de tiempo de la que riegan, los que están cerca del punto pivote.

También mencionan que la tasa de precipitación varía a lo largo de la línea lateral desde valores muy bajos cerca del punto pivote, hasta valores relativamente altos en el otro extremo de la línea. Indicando que la tasa de precipitación de aspersión es determinada por el tamaño de las boquillas de los aspersores o emisores, la presión a la boquilla, el espaciamiento entre aspersores o emisores, la longitud de la línea lateral y el tipo de aspersor o emisor usado.

## Determinación de las áreas a irrigar.



**Figura 3.** Distribución de medidas según el radio del pivote para cada 25 %.

### 2.6.EVALUACIÓN TÉCNICA DE UN PIVOTE CENTRAL.

La evaluación hidráulica de un sistema de riego tipo pivote central consiste en analizar a través de técnicas basadas en mediciones de campo, su correcto funcionamiento bajo condiciones reales de uso, y en determinar la eficiencia del sistema. Además, verificar los parámetros de funcionamiento de la máquina, entre ellos: la presión, el caudal descargado, la velocidad de avance, la tasa de aplicación.

(Chuy Moe, 1972) estudiaron el sistema hidráulico de un sistema de pivote central y desarrollaron una aproximación rápida para determinar la pérdida de presión desde el pivote, al extremo exterior del lateral como una constante (0.543) veces la pérdida que se produciría si toda la descarga fluía la longitud total del lateral.

## **2.7. COMPONENTES Y DESCRIPCIÓN DEL PIVOTE CENTRAL**

### **2.7.1. 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 portam emisores que va sustentada sobre torres automotrices. Tiene aproximadamente desde 2 a once torres o más. 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).

La tubería, que normalmente es de acero galvanizado, sirve de elemento resistente para vencer el vano entre torres juntamente con barras o cables, formando una viga en celosía, dejando un vano hasta el suelo de unos 3 m.

Cada tramo va unido a una torre soporte y articulado con el tramo anterior, debiendo permitir giros según un eje vertical y otro horizontal. La unión debe ser estanca y sólida ya que tiene que transmitir esfuerzos importantes, especialmente en equipos trasladables.

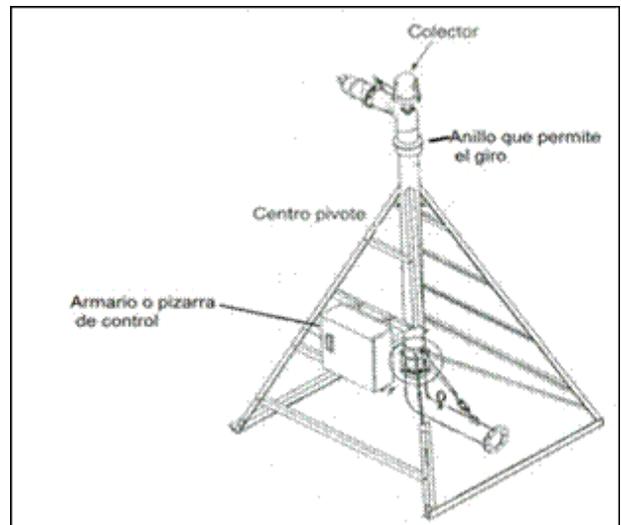
### **2.7.2. PUNTO PIVOTE**

Estructura de acero en forma de pirámide, alrededor de la cual gira todo el sistema, normalmente tiene cuatro patas que están anclada en un macizo de hormigón, que sostiene un tramo vertical de tubería con una junta estanca a base de anillos rozantes, que permite el giro. El agua entra por la base del pivote y continúa a través del tubo de subida y del codo giratorio.

También suele llevar al principio una válvula de compuerta y otra de retención, así como algún elemento de control como un manómetro.

Esta estructura se encuentra Anclada sobre una losa de concreto armado que absorbe perfectamente los esfuerzos de trabajo generados por la topografía del terreno y la rotación de la máquina. En la base se coloca la caja de control que permite coordinar la operación manual y automática de la unidad de bombeo, la velocidad y sentidos de giro del lateral.

También en el codo superior va un colector de anillos rozantes que realiza las conexiones de los cables de alimentación de los motores de las torres y de seguridad y control con el cuadro de maniobra que va fijo en la estructura del pivote.



**Figura 4.** Centro pivote (soporte de movimientos bruscos).

## **PANEL O GABINETE DE CONTROL**

El sistema eléctrico suele estar formado por: cuadro de control y maniobra y el colector de anillos rozantes, localizados ambos en el pivote central, los cables conductores de tramo y las cajas de control de torres.

El cuadro central controla:

Velocidad de desplazamiento. Y sentido de avance

Arranque- realineación.

Parada en una posición y conmutador sectorial, que permiten regar un sector circular.

Funcionamiento coordinado de bomba y pivote, de forma automática, o arranque desde la estación de bombeo.

El colector realiza las conexiones eléctricas entre las partes móviles y las fijas.

Los mecanismos de seguridad se centran sobre todo en parar el equipo cuando se supera un cierto ángulo entre tramos.

Parada por temperatura o baja presión

Arranque automático tras fallo energético

Control del esquinero y cañón final

Si el temporizador de velocidad está al 100%, la última torre estará en continuo movimiento, el sistema estará a su máxima velocidad y aplicando la menor cantidad de agua., Para incrementar el riego, el sistema debe ir más despacio.

Para el alineamiento en cada una de las torres intermedias, se encuentra una barra de control unida a la base de la caja eléctrica de la torre y al tramo siguiente. Al moverse la última torre, la barra de control de la penúltima va girando, al detectar desalineación enciende y apaga el micro de trabajo, activando el motor de la torre que se mueve hasta que está en línea con la siguiente torre.

También se tiene un circuito de seguridad en cada torre tiene un micro de seguridad. Si por cualquier causa el sistema se sale demasiado de su alineamiento, estos micros paran el sistema. Con ello se evitan daños estructurales.



**Figura 5.**Gabinete de control ubicado en punto pivote.

### **2.7.3. COLECTOR DE ANILLO ROZANTES**

El anillo colector situado en la parte superior de la estructura sobre la que gira (centro pivote); permite que toda la energía eléctrica se mantenga fuera del tubo de subida del agua, tomando los 380 v de fuerza del panel principal y distribuyéndola del centro de mando a cada torre. Las claves de su fiabilidad son su montaje externo, su diseño externo que evita la pérdida de cargas adicionales, y una robusta cubierta de poliéster prensado resistente a la corrosión protege el anillo de la humedad.

El cable se conecta a un interruptor eléctrico, posicionado uno sobre cada torre, el cual permite que fluya energía al motor de la respectiva torre y éstos a su vez generan un movimiento rotativo que se conduce hacia cajas de engranajes por medio de transmisiones. Cada caja de engranajes está conectada a uno de los neumáticos o ruedas de las torres, de esa forma se genera el desplazamiento del pivote. El colector está compuesto de unos anillos de latón apilado y aislado unos de otros. Éstos están fijos, unas escobillas giran alrededor transmitiendo la electricidad, sin forzar el cable mientras el sistema está dando vueltas alrededor del campo. Un tubo en J permite llevar el cable eléctrico desde la base del pivote hasta el colector.

La energía se conduce por un cable de 11 líneas, el cual sale del generador, pasando por un anillo colector que convierte el flujo vertical de corriente a flujo horizontal.



**Figura 6.** Anillo que permite el (giro y porta corriente).

#### 2.7.4. LATERAL

La separación entre torres varía entre 25 y 75m, aunque las más frecuentes son de unos 38m (tramo corto) y 50m (tramo largo)

Los tramos, que tienen forma de arco, constan de tubería principal que puede ser de diferentes diámetros y de una serie de tirantes y estructuras en forma de V que dan mayor firmeza y seguridad al conjunto. Las diferentes longitudes de los tramos permiten al unirlos unos a otros, formar longitudes totales distintas. La unión entre tramos se hace mediante enganches que permiten oscilaciones (laterales y verticales) y conexiones para la unión.

- Los equipos de tramo largo son, normalmente, más económicos (menos torres), pero se adaptan peor a ondulaciones del terreno y al transmitir más peso hay mayores posibilidades de atascos.

- Las longitudes del lateral van de 60 a 800m. La inversión por Ha regada, disminuye al aumentar la longitud del equipo, pero el coste de aplicación de agua, teniendo en cuenta todos los gastos, permanece constante a partir de 50-60 Has regadas (al crecer mucho el coste energético).



**Figura 7.** Sistema de propulsión con motor en torre.

### 2.7.5. TUBERÍA PORTA EMISORES

Suele ser de diámetro único y adecuado al caudal a transportar, el cual depende de las necesidades del cultivo y de la superficie a regar. Deber ser sólida, para soportar el vano y resistente a la corrosión, pues a veces se distribuye por el agua abonos y fitosanitarios.

- Los diámetros nominales de tubería (exteriores) suelen ser 4 ½ "; 5 9/16 "; 6"; 6 5/8"; 8"; y 10" (entre 114mm y 254mm).

- En laterales de gran longitud (más de 500m) a veces se usan dos diámetros.

- El diámetro de 4 ½ " se usa en longitudes menores de 300m a los cuales se les denomina (mini pivotes).

Las tuberías se fabrican principalmente de acero galvanizado, interior y exteriormente, aunque también pueden ser de aluminio o acero revestido con pintura epoxi.

El espesor de tubería de acero está comprendido normalmente entre 2,5 y 4,0 mm según los diámetros, siendo los más frecuentes de 2,65 y 3,2 mm.



**Figura 8.** Sistema de tubería y triangulación porta emisores.

### 2.7.6. ALINEAMIENTOS

Para mantener esto el lateral se dispone de un mecanismo de alineamiento, que arrancan o paran el avance de cada torre conductora mediante un contactor eléctrico, cuando los dos tramos que concurren en la torre forman un ángulo de unos 20°. Así, el avance de la unidad conductora extrema produce una reacción en cadena de avances. También existen mecanismos que paran el sistema cuando la última torre (que es la de control) falla.



Figura 9. Sistema de alineamiento de cada torre.

### 2.7.7. CUELLOS DE GANSO

Están contruidos en termoplástico no-corrosivo resistente a los rayos UV para mayor vida útil y menor taponamiento a causa de crecimiento de bacterias. Los cuellos de ganso permiten colocar el aspersor más cerca del cultivo, a fin de reducir la deriva por el viento.



**Figura 10.** Cuellos de ganso con niple en su punta de conexión.

Las presentaciones más comunes son las siguientes, todos con rosca macho de  $\frac{3}{4}$  y salidas niple de  $\frac{3}{4}$ , ya solo es necesario ajustar la manguera con una abrazadera de acero inoxidable.

### **2.7.8. COLGANTE**

En el campo del riego mecanizado, el avance más significativo en lo que respecta a la eficiencia de riego ha sido la instalación de los emisores en bajantes o drops. Los bajantes son piezas de acero galvanizado rígidos o de manguera flexible que permiten acercar la aspersion al suelo y reducir sensiblemente la evaporación y la dispersión por el viento. Los bajantes rígidos trabajan muy bien para ciertas aplicaciones, sin embargo, están limitados a una longitud fija y en ocasiones se requiere alejar o acercar los aspersores al terreno del cultivo. Los bajantes flexibles permiten mover los aspersores de acuerdo a las condiciones del suelo, viento, cultivo. Los bajantes flexibles absorben las vibraciones asociadas a los aspersores de baja presión y permiten al agricultor elegir el mejor nivel del aspersor arriba del terreno.

La Manguera para bajante, especialmente diseñada para instalarse en pivotes y sistemas laterales es fabricada en tubería flexible y reforzada de 20mm de diámetro, y permite ser enrollada para ajustar la altura del emisor en función del desarrollo del cultivo.

Manguera reforzada flexible de 3/4" extremadamente durable. Su construcción duradera con cobertura de PVC resistente a UV, fibras de refuerzo de poliéster y un núcleo de tubería de PVC garantizan su vida útil de 2 años.

Manguera negra.

Fabricada en 3 capas: tubo interior de PVC, refuerzo de poliéster y camisa de PVC exterior.

Flexible y ligera

Resistente a la abrasión y a los rayos UVA.



**Figura 11.** Manguera para colgante y tipos de colgantes.

### 2.7.9. ADAPTADORES

Construidos en termoplástico no-corrosivo y resistente a UV para mayor vida útil. Fáciles de usar, se conectan fácilmente a la manguera reforzada de 3/4".

El adaptador remarcado es exclusivo para las conexiones Nelson.



**Figura 12.** Conexiones de cuello de ganso a bajante (hembras inser y machos inser).

### 2.7.10. CONTRAPESOS

Proporciona estabilidad para los bajantes de los aspersores de pivote.



**Figura 13.** Contrapeso para evitar el movimiento de los bajantes por efecto del viento.

### **2.7.11. REGULADORES DE PRESIÓN**

Las fluctuaciones no controladas de presión en los sistemas de riego producen desviaciones de flujo no deseadas y exceso de riego. Las causas más comunes de variación de presión son: cambios de elevación y cambios en la demanda del sistema y suministro de agua. De acuerdo con lo anterior se requieren los reguladores de presión para prevenir estas fluctuaciones, evitar el exceso de riego y mantener la eficacia general del sistema de irrigación.

El exceso de riego aumenta la intensidad de aspersion y puede producir compactación del suelo, sellado del mismo y escurrimiento. Se recomiendan reguladores que mantengan una salida constante y prefijada un que varíen las presiones de entrada. Las recomendaciones para una buena elección de los reguladores de presión son los que permita ahorrar agua y aumentar la producción y cumplan las características siguientes: reguladores de presión de un sistema de riego Pivotes sirven para convertir una presión de entrada variable en una presión de salida fija, cualesquiera que sean los cambios de presión del sistema causados por las condiciones hidráulicas, desniveles, técnicas de bombeo, etc. Las ventajas incluyen una profundidad uniforme de riego, un rendimiento controlado (tamaño de gotas y alcance) y flexibilidad de operación.

Regulan movimientos súbitos de presión para evitar los golpes de ariete, impiden que se acumulen los residuos y que se formen atascos, reducen el rozamiento y la histéresis.

### **2.7.12. FUNCIÓN DE LOS REGULADORES DE PRESIÓN.**

Se admite internacionalmente una variación máxima, en más o en menos, del 20% de la presión nominal, que produce una variación de igual signo del 9,5% en el caudal.

Para variaciones de desnivel superiores al 20% de la presión nominal, se hace obligado el uso de los reguladores de presión.

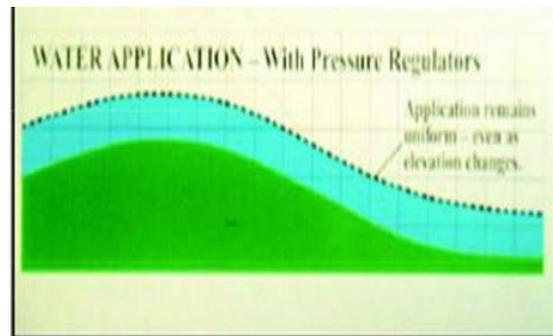
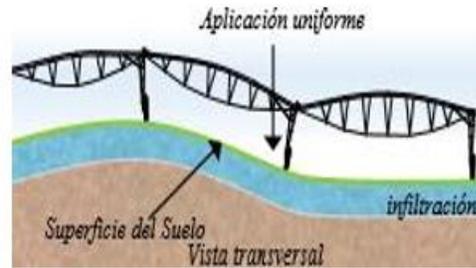
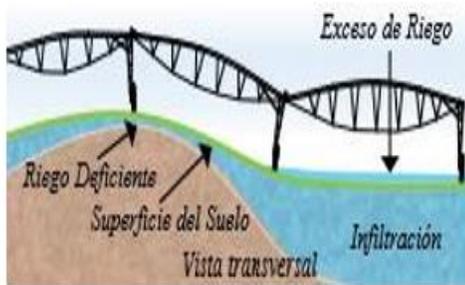
#### **Características**

Exactitud comprobada del 100% en el agua	Presiones: 6-50 psi (0.41-3.45 bar)
Alojamiento inalterable	Caudales: 0.5 - 15 gpm (114 - 3407 L/hr)
Circuito de caudal máximo que resiste el taponamiento	Tamaño de entrada: 3/4" F NPT
Histéresis y pérdida por fricción muy bajas	Tamaño de salida: 3/4" F NPT

Los principales fabricantes de Reguladores de presión para Pívo son Nelson y Senninger Reguladores de presión. Los reguladores de presión pueden variar la diferencia de presiones según sea el fabricante o el modelo de estos, puede haber de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 que son las presiones que se usan en los pivotes centrales.



**Figura 14.** Diferentes tipos de reguladores (presión, salidas y marca).



Sin reguladores de presión

Con reguladores de presión

**Figura 15.** Distribución del agua de acuerdo a la topografía con o sin reguladores.

Las presiones se mantienen constantes por medio de la topografía.

### **2.7.13. ROCIADORES O EMISORES**

Los regantes que utilizan pivotes centrales buscan maneras de reducir el uso de agua y los costos de energía constantemente, aumentando al mismo tiempo el rendimiento de sus cultivos. Un paquete de aspersores correctamente diseñado contribuirá a garantizar que se cumplan estas metas.

Pueden ser de tres tipos:

Aspersores giratorios

Toberas pulverizadoras

Cañones de extremo.

La intensidad y uniformidad de lluvia que proporciona el lateral depende de:

Tipo de emisor.

Espaciamiento en la tubería.

Presión en las boquillas.

Tamaño de las boquillas.

Es principalmente en los emisores donde se producen mayores innovaciones, al tratar de conseguir que trabajen a baja presión, con tamaño medio de gota y con la mayor anchura posible.

Existen tres modelos de aplicación de agua que se diferencian en:

El tipo de rociador

Su disposición a lo largo del lateral

El diámetro de alcance de cada emisor

Pudiendo conseguir con todos ellos una distribución uniforme.

A.- Sistema con aspersores de tamaño creciente desde el centro del pivote al extremo, que funcionan con alta presión (más de 3 Kg/cm<sup>2</sup>), con anchura mojada en el extremo entre 35 y 50m.

B.- Sistemas con aspersores de tamaño medio, pero con menor espaciamiento a medida que se aproximan al extremo, que trabajan a media presión (2-3 Kg/cm<sup>2</sup>), con anchura mojada en casi todo el lateral entre 20 y 30m.

C.- Sistemas con tobera pulverizadoras que trabajan a baja presión (0,7-1,7 Kg/cm<sup>2</sup>). Su separación disminuye al acercarse al extremo y la anchura mojada es de 6 a 15m en todo el lateral.



Figura 16. Diferentes tipos de difusores o emisores utilizados en pivotes centrales.

## 2.7.14. ASPERSORES NELSON IRRIGATION

	GAMA DE PRESIONES	PLUVIOMETRÍA	INSTALACIÓN	ALCANCE
 R3000	15 a 50 PSI (1 a 3,4 bar)	BAJA	Encima del pivote o en bajantes	50 a 74" (15,2 a 22,6m)
 S3000	10 a 20 PSI (0,7 a 1,4 bar)	BAJA - MEDIANA	Sobre bajantes	42 a 54" (12,8 a 16,5m)
 N3000	10 a 15 PSI (0,7 a 1 bar)	BAJA - MEDIANA	Sobre bajantes (tubo flexible)	44 a 52" (13,4 a 15,9m)
 D3000	6 a 40 PSI (0,41 a 2,8 bar)	ALTA	Encima del pivote o en bajantes	16 a 40" (4,9 a 12,2m)
 A3000	10 a 15 PSI (0,7 a 1 bar)	MEDIANA	En bajantes	30 a 46" (9,1 a 14,0m)
 T3000	Depende del tipo de aspersor	BAJA - ALTA	Encima del pivote o en bajantes flexibilice la boquilla 3000°C con bajantes flexibles.	Depende del tipo de aspersor

Figura 17. Características de los aspersores utilizados en el pivote central.

La figura ilustra una curva de infiltración típica con las tasas de aplicación súper impuestas de los aspersores para pivotes.

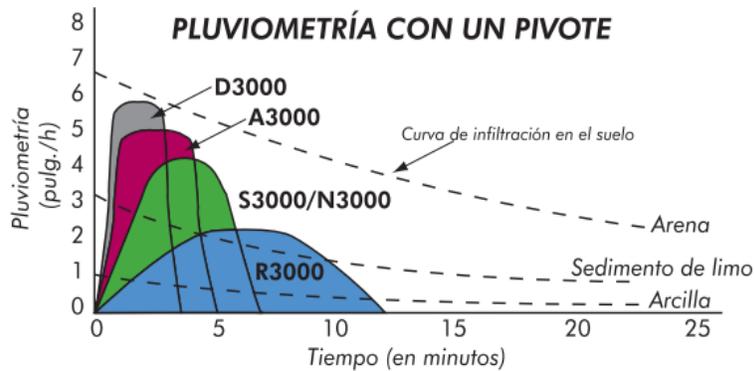


Figura 18. Curvas de infiltración según los aspersores de Nelson Irrigation.

Descripción.

Codificadas por color para fácil identificación de tamaño

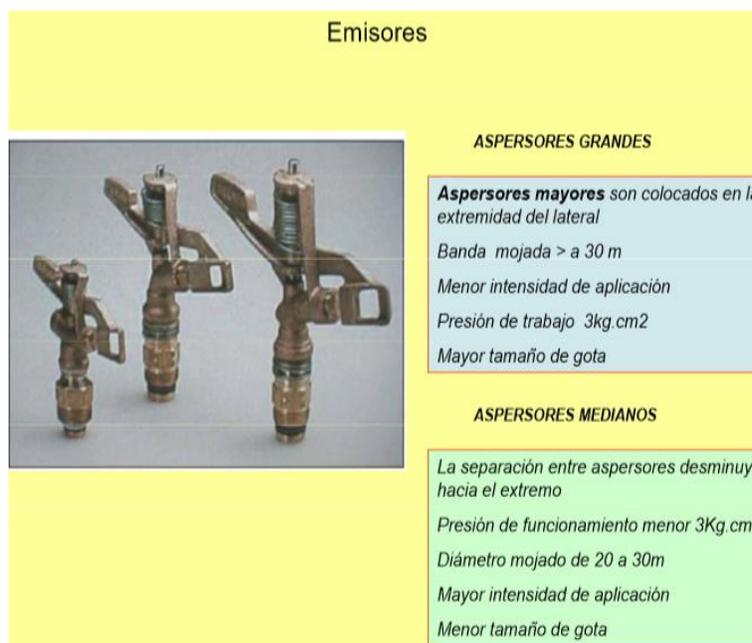
Excelente durabilidad

Garantizadas a mantener su diámetro de orificio correcto

#4 Celeste	1/16	(0.063) in.	(1.59mm)
#5 Beige	5/64	(0.078) in.	(1.98mm)
#6 Dorado	3/32	(0.094) in.	(2.38mm)
#7 Lima	7/64	(0.109) in.	(2.78mm)
#8 Lavanda	1/8	(0.125) in.	(3.18mm)
#9 Gris	9/64	(0.141) in.	(3.57mm)
#10 Turquesa	5/32	(0.156) in.	(3.97mm)
#11 Amarillo	11/64	(0.172) in.	(4.37mm)
#12 Rojo	3/16	(0.188) in.	(4.76mm)
#13 Blanca	13/64	(0.203) in.	(5.16mm)
#14 Azul	7/32	(0.219) in.	(5.56mm)
#15 Marrón Oscuro	15/64	(0.234) in.	(5.95mm)
#16 Naranja	1/4	(0.250) in.	(6.35mm)
#17 Verde Oscuro	17/64	(0.266) in.	(6.75mm)
#18 Púrpura	9/32	(0.281) in.	(7.14mm)
#19 Negro	19/64	(0.297) in.	(7.54mm)
#20 Turquesa Oscuro	5/16	(0.313) in.	(7.94mm)
#21 Mostaza	21/64	(0.328) in.	(8.33mm)
#22 Granate	11/32	(0.344) in.	(8.73mm)
#23 Crema	23/64	(0.359) in.	(9.13mm)
#24 Azul Oscuro	3/8	(0.375) in.	(9.53mm)
#25 Cobre	25/64	(0.391) in.	(9.92mm)
#26 Bronce	13/32	(0.406) in.	(10.32mm)

**Figura 19.** Gama de tipo de boquillas Senninger para aspersores o emisores.

En los extremos del lateral pueden ponerse cañones, que funcionan entre 3,5 y 5 Kg/cm<sup>2</sup> (se hace necesaria una bomba de sobrepresión) no indicados para zonas con mucho viento. La principal ventaja de los cañones es cubrir una zona entre 15 y 30m más allá del extremo del lateral.



**Figura 20.** Cañones finales para pivotes centrales.

### **2.7.15. SISTEMA DE PROPULSIÓN**

La propulsión es normalmente con motores eléctricos, por tener ventajas sobre los otros sistemas al permitir una fácil regulación de la velocidad y el sentido de avance, así como poder moverse sin necesidad de regar.

En cada torre lleva un motor de 1,5; 1; 3/4 o 1/2 CV que transmite el movimiento a las dos ruedas.

La velocidad de avance del equipo se regula actuando sobre el motor de la torre extrema, haciéndola funcionar en fracciones de minuto, en cuyo caso alcanza una velocidad de 1,5 a 1,8 m/min, e incluso 3 m/min cuando se trata de laterales de gran longitud.

Las ruedas suelen ser neumáticas, de unos 50 cm de radio, aunque existen las denominadas "de alta flotación" que son más anchas y de radio 52,5 cm, que tienden a evitar el hundimiento en el terreno, aunque no siempre se consigue.

## **Sistema de Propulsión**



**Figura 21.** Sistema de propulsión neumática.

## **2.7.16. SISTEMA ELÉCTRICO**

Suministro eléctrico en la torre del Pivote

Los motores que van en las torres que forman un sistema de riego Pivote eléctrico, requieren de una alimentación trifásica de 380V 50Hz o 460V 60Hz. Además, este suministro eléctrico podrá venir proporcionado por la compañía eléctrica, por un grupo electrógeno o por un inversor senoidal trifásico. El diseño del servicio eléctrico para determinar la potencia a contratar y la sección de los conductores eléctricos del sistema, debe tomarse con la misma consideración que para determinar el suministro de agua.

Cajas de control de torre

## **3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PIVOTE CENTRAL**

### **3.1. VENTAJAS**

El abastecimiento de agua es regular y sumamente fácil, ya que el punto central estacionario permite esta particularidad.

El punto central fijo facilita también el control del movimiento y la alineación del brazo rotatorio.

Al terminar la aplicación de un riego, la lateral se encuentra en posición adecuada para el inicio del siguiente.

Con los aspersores regantes en movimiento se pueden obtener uniformidades de aplicación muy altas, disminuyendo así, el efecto que pudiera tener el viento sobre la distribución del agua.

Según (Jensen, 1980), los equipos de aspersión de Pivote central son mejores sobre los equipos estacionarios bajo condiciones de viento.

El espaciamiento entre aspersores en la mayoría de estos equipos no es mayor de 12 m obteniéndose altas uniformidades de distribución.

### **3.2. DESVENTAJAS**

Debido a la particularidad de regar superficies circulares tratándose de campos con lados rectos como son la mayoría, el equipo que se proyecte solo podrá regar un máximo de 90% de la superficie, ya que no puede hacerlo en las esquinas.

Las diferencias de elevación que puedan existir entre los extremos del lateral hacen más difícil el diseño hidráulico del equipo.

El pivote central requiere una inversión bastante alta, debiéndose efectuar un estudio económico financiero, para poder seleccionar este sistema.

Estos equipos presentan aspersores a mayores alturas sobre la superficie del suelo, por lo tanto, están sujetos a los efectos de altas velocidades del viento.

Mano de obra especializada para mantenimiento del sistema.

### **4. VELOCIDAD DEL VIENTO**

El viento es uno de los factores más condicionantes del riego por aspersión. Las gotas de lluvia que simula el método son arrastradas fácilmente por este, lo que impide una buena uniformidad de aplicación. Tanto la distribución del agua de los aspersores como su disposición en el campo están sujetos a la interacción con el viento, siendo éste el principal distorsionador de la uniformidad de riego.

La repercusión será diferente según el tamaño de gota y según la trayectoria que debe recorrer ésta en su caída, influyendo también en la evaporación y en el arrastre del agua fuera del área regada.

(Jensen, 1980), asegura que es muy importante tomar en cuenta este factor climático, ya que modifica apreciablemente la uniformidad de aplicación sobre el terreno.

Por ello las condiciones del viento (velocidad y dirección) se deben determinar de antemano, para considerarlas en el diseño, y poder reducir su efecto al mínimo.

Los sistemas de riego Pivote y sistemas laterales o de avance frontal ofrecen ventajas con respecto a los sistemas de riego fijos o estacionarios en lo concerniente a los efectos del viento.

1. Los Pivotes ocupan infinitas posiciones en su recorrido (en su movimiento de traslación) y por tanto, cada punto se regará normalmente bajo distintas condiciones de viento en los riegos sucesivos, compensándose las distorsiones que hubieran podido producirse por el viento.

2. El espaciamiento de aspersores o emisores en la tubería principal del Pivote es bastante pequeño (distancia máxima entre salidas de 3 metros), solapándose perfectamente las áreas de riego de unos con otros (Irrigation fifth edición). Tesis. -pag. 216

El principal efecto del viento sobre el riego con sistemas pivotes es el cambio de superficie mojada que se presenta cuando el viento sopla en el mismo sentido que la dirección longitudinal de la máquina. Así, cuando el viento sopla hacia la cabeza o centro del Pivote,

el área mojada disminuye alrededor de un 17%, mientras que cuando sopla hacia el voladizo o alero, el área mojada crece alrededor de un 19%.

#### **4.1. COMO SOLUCIONAR ESTOS EFECTOS**

Una desventaja de estos sistemas es la altura a la que se encuentran los aspersores con respecto al suelo (a 4 metros de altura) en comparación con los sistemas de cobertura, que se suelen encontrar a un máximo de 2 metros de altura con respecto al terreno. A mayor altura, lógicamente les afecta más la velocidad del viento. Para reducir esta desventaja, en los sistemas de Pivote se utilizan aspersores de ángulo bajo (del orden de 8°), o se instalan drops o bajantes para situar los emisores más cerca del suelo. La distancia más aconsejable es de 2 metros sobre el nivel del suelo, con lo que se consigue una disminución de las pérdidas por evaporación y arrastre por los efectos del viento de entre el 30 y el 40% de las existentes con los aspersores instalados arriba sobre la tubería principal del Pívor, al tiempo que se mantiene la uniformidad de riego (Irrigation fifth edición). Tesis. -pag. 216

En estos casos se recomienda en horas de menor o ausencia total del viento. Muchas de las veces este efecto se compensa con disminuir la separación de los aspersores o utilizar emisores que proporcionen gotas más grandes que por su peso eviten el arrastre. (Varas, B.E., Sandoval, H. J. 1989).

## **5. CONTENIDO DE HUMEDAD**

La importancia del contenido de agua que presenta un suelo representa junto con la cantidad de aire, una de las características más importantes para explicar el comportamiento de este (especialmente en aquellos de textura más fina), como por ejemplo cambios de volumen, cohesión, estabilidad mecánica.

## **6. VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN**

Es la cantidad de agua en movimiento que atraviesa verticalmente la superficie del suelo producto de la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares, esta cantidad de agua quedara retenida en el suelo o alcanzara el nivel freático del acuífero, incrementando el volumen de este.

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.

La fórmula obtenida con el modelo obtenido de Kostiaikov-Lewis, se puede calcular la velocidad de infiltración en un tiempo determinado y obtenerse valores ajustados:

Kostiakov, en 1932 (Ravi y Williams, 1998) propuso las siguientes ecuaciones de carácter empírico para estimar la tasa de infiltración y la infiltración acumulada.

El ensayo se debe realizar con un suficiente período de tiempo de manera de alcanzar los valores asintóticos o iguales de la capacidad de infiltración, que tienden a la infiltración.

$$F = C * T^m$$

F = Lámina total infiltrada en el tiempo t.

T = tiempo.

C y m = parámetros a determinar con datos experimentales

Derivando la ecuación con respecto al tiempo:

$$F = m * C * T^{(m-1)}$$

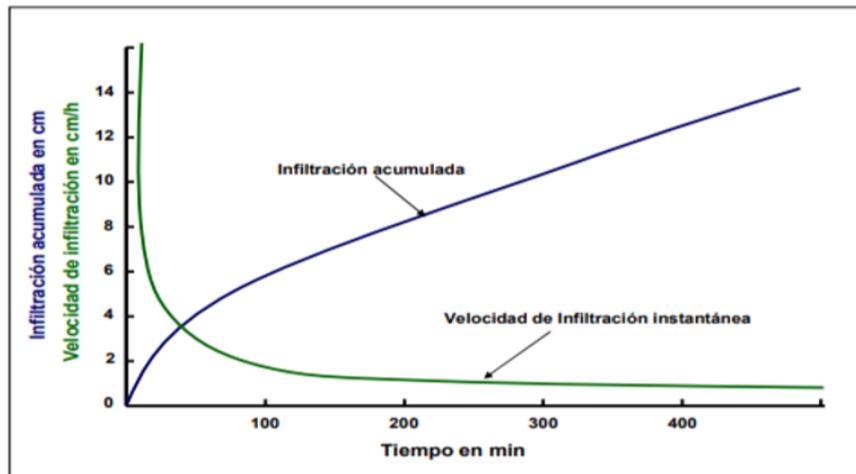
Si hacemos que:

$$K = m * C$$

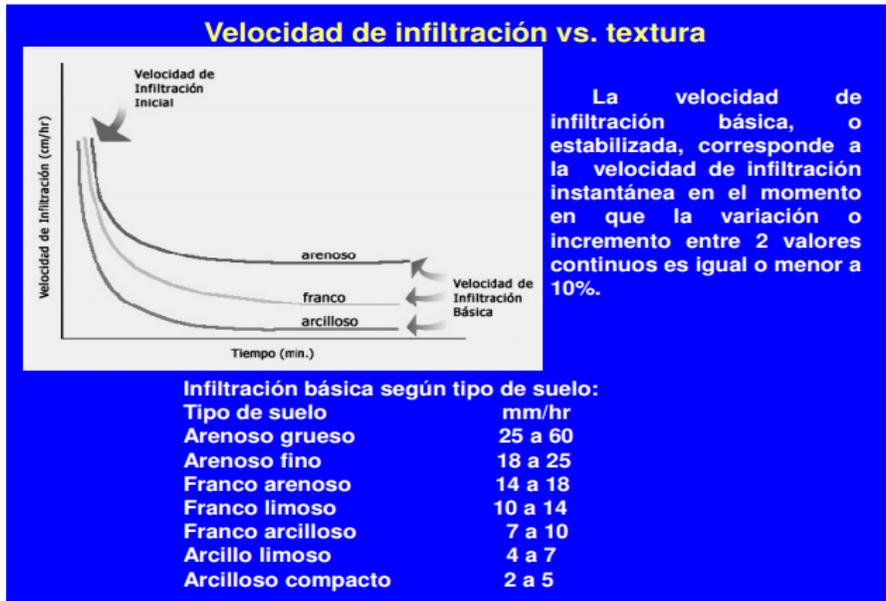
$$n = 1 - m$$

Obtenemos:

$$F = K * T^{-n}$$



**Figura 22.** Comportamiento de la velocidad de infiltración y la infiltración acumulada.



**Figura 23.** Valores de infiltración en mm/h, según la textura del suelo.

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)

## 7. EL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE LOS SISTEMAS POR ASPERSIÓN (CHRISTIANSEN)

Fue desarrollado por Christiansen (1942). Es una representación estadística de la uniformidad, utilizado principalmente en los sistemas de aspersión; es el parámetro de uniformidad de uso más generalizado. Se expresa en % mediante la expresión siguiente:

$$CUC = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})}{\bar{Y}N} \right] * 100$$

Donde:

CUC=coeficiente de uniformidad de Christiansen en %

$\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})$  = es la sumatorias de las desviaciones de las observaciones individuales

$Y_i$  = altura del agua recogida por cada pluviómetro o bote de captación

$\bar{Y}$  = altura media del agua recogida de todos los pluviómetros

$N$  = número de pluviómetros o botes utilizados en la captación de la pluviometría.

El coeficiente de uniformidad de Christiansen es ampliamente usado, y un CUC igual o mayor que 0.7 es considerado aceptable en la práctica del diseño de sistemas de riego por aspersión. La significancia del coeficiente de uniformidad y el de los dos parámetros de la eficiencia ( $E_a$  y  $E_r$ ) es ilustrada en la siguiente figura, asumiendo que no existen pérdidas por escurrimiento. (Hansen, 1960).

$E_a$  = Es la relación que existe entre el agua atrapada en la zona radicular o sea la zona

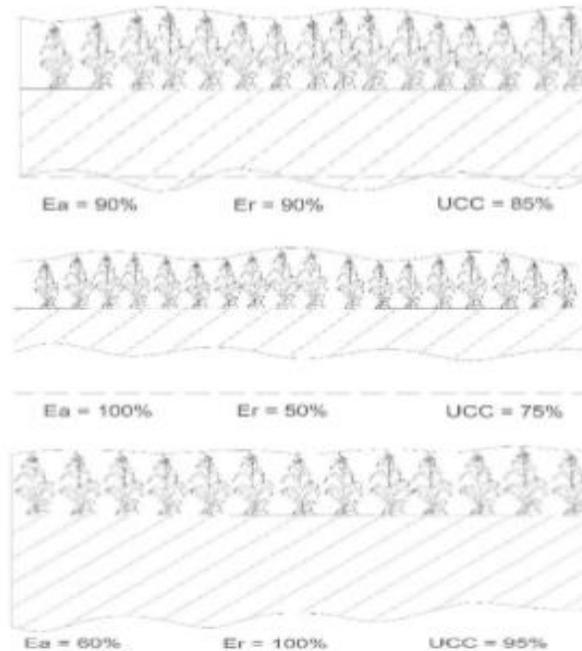
I / El agua total aplicada Zona I +III

$$E_a = \left( \frac{I}{(I + III)} \right) * 100$$

$E_r$  = Es la relación que existe entre el agua atrapada en la zona radicular o sea la zona I

/ El agua total requerida I + II

$$E_r = \left( \frac{I}{(I + II)} \right) * 100$$



**Figura 24.** Diferentes escenarios de la distribución del agua aportada por un equipo bajo riego.

## 8. TAZA DE PRECIPITACIÓN O PLUVIOMETRÍA

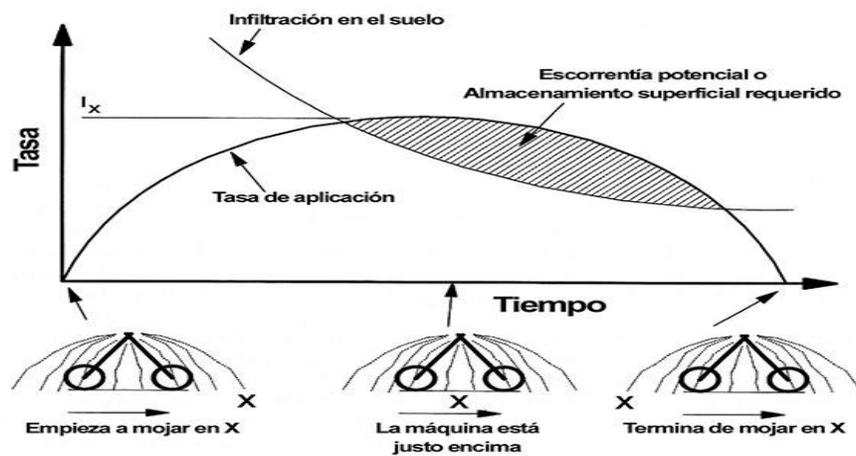
La Eficiencia de descarga indica la relación entre la altura media de agua recogida por los pluviómetros y la altura media descargada por los emisores. La diferencia entre ambos valores corresponde a las pérdidas por evaporación y deriva durante el proceso del riego, debido fundamentalmente al efecto de las condiciones climáticas (temperatura, humedad, viento, etc.), además de los errores propios de la metodología (Tarjuelo, 1999).

A partir del agua recogida en cada línea de pluviómetros (A y B), se determinó la altura de agua media recogida en cada tramo del pivote ( $A_{mrt}$ ) y la media del equipo ( $A_{mr}$ ). El valor correspondiente a un 15% más y un 15% menos de esta última, permite establecer en términos de áreas, las superficies sobre, adecuadamente y sub regadas. Otro de los

parámetros calculados correspondió a la Uniformidad de Distribución (UD), la cual para equipos pivote debiera estar entre 70 y 80% (De Santo Olalla y De Juan Valero, 1993).

Tasa de precipitación la aporta el equipo de riego como una acción mecánica hidráulica dependiendo del tiempo que dure el riego sobre un punto y en este caso se expresa en % de avance, pero esta no debe de ser Mayor que la velocidad de infiltración del suelo.

La pluviometría instantánea es la cantidad de agua en milímetros por hora aplicada sobre un área determinada de terreno, al pasar regando el sistema de riego Pivote por esa zona. Los terrenos, en su mayoría, tienen un coeficiente de absorción de agua inferior a 13 milímetros por hora, si la pluviometría instantánea es superior, en casi todos los suelos, salvo en los arenosos, puede provocar escorrentías.



**Figura 25.** Aplicación de la pluviometría en el suelo bajo riego.

## **9. CILINDROS INFILTRÓMETROS**

Constituido por dos superficies cilíndricas abiertas por las bases e hincadas parcialmente en el terreno a una profundidad de unos 10 cm. Se añade una cantidad conocida de

Agua hasta que cubra una lámina determinada, tanto en el cilindro interior como exterior.

La función del cilindro exterior es eliminar los efectos de dispersión lateral del flujo de infiltración que medimos y que debe ser vertical, a los efectos de representar fielmente las condiciones reales. Se miden los tiempos necesarios para incorporar o infiltrar una lámina determinada de agua en el suelo, deduciendo de esta manera la capacidad de infiltración en ese instante determinado.

## 10. MÉTODOS Y MATERIALES

### 10.1. LOCALIZACIÓN DE PROYECTO

El proyecto de investigación se llevó a cabo en la sierra de Arteaga Coahuila en el portal San Antonio, región montañosa, ubicada en el kilómetro 6.57 de la carretera a San Antonio de las Alazanas, coordenadas UTM siguientes:

Nombre:  

Zona:

Coordenada Este:

Coordenada Norte:

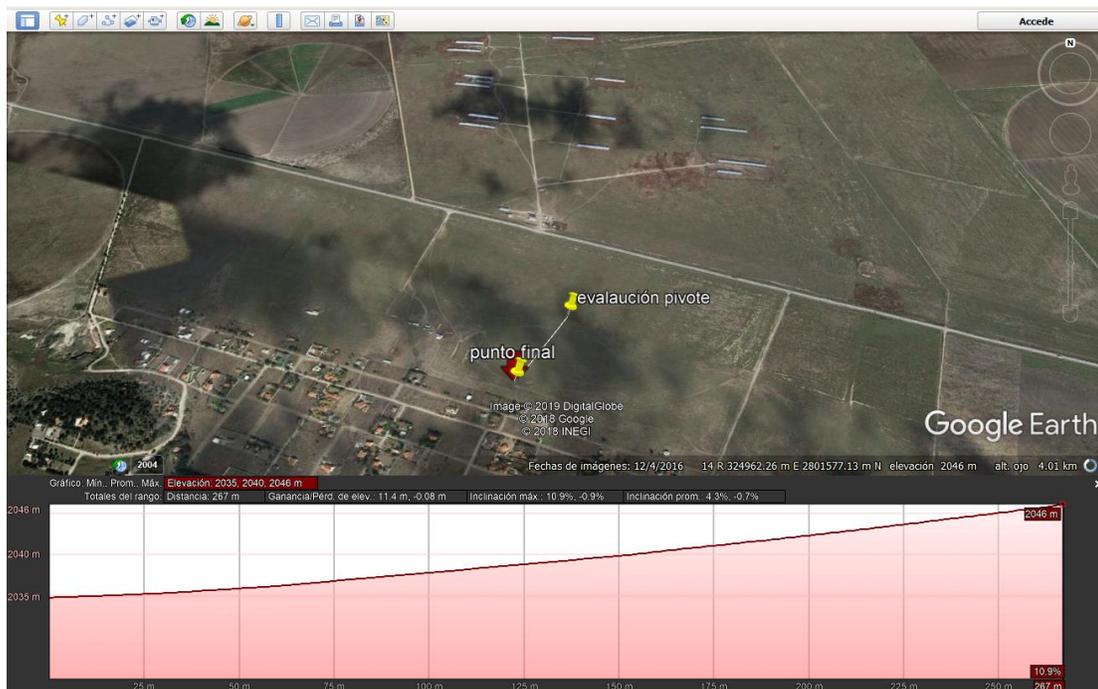


Figura 26. Localización y perfil del pivote central de evaluación.



**Figura 27.** Localización del área de estudio.

La localidad se encuentra a una mediana altura de 2031 metros sobre el nivel del mar.

En esta localidad se evaluarán las siguientes variables.

El pivote central se suministra con 2 pozos profundos que suministran agua a un punto en paralelo para llegar al punto pivote y así poder realizar su función como equipo de riego.

## 10.2. EL ÁREA DEL PIVOTE

Los pivotes evaluados tienen 6 torres cada una de ellas mide 45 mts por lo cual su radio es de 270 m + un voladizo de 6 mts.

$$A = \pi r^2$$

$$A = \frac{(\pi 276^2)}{10000} = 23.9192 \text{ has}$$

El método consiste en evaluar tanto las descargas del aspersor como el gasto recibido en el suelo para una velocidad baja (5 k/h), esto será el testigo de la prueba ya que, se evaluará a diferentes velocidades por encima de 16 kph para poder correlacionar estos valores, a la misma velocidad de avance del pivote y, con el mismo intervalo de riego.

## 10.3. VELOCIDAD DE AVANCE

Posterior mente se calcula el parámetro de velocidad de avance con el fin de saber a qué velocidad se mueve el pivote de un punto a otro, y así saber en qué tiempo terminara de irrigar esa área determinada.

$$\text{velocidad de avance} = \frac{\text{longitud en metros de recorrido}}{\text{Tiempo en horas}}$$

$$\text{velocidad de avance} = \frac{40 \text{ mts}}{1,47 \text{ hrs}} = 27.21 \frac{\text{mts}}{\text{h}}$$

$$\text{tiempo de irrigación} = \frac{\text{diametro del pivote}}{\text{velocidad de avance}}$$

$$\text{tiempo de irrigación} = \frac{\pi D}{VA} = \frac{\pi(276 * 2)}{27.21} = \frac{1734.16 \text{ m}}{27.21} = \frac{63.735 \text{ h}}{24 \text{ h}} = 2.65 \text{ dias}$$

## 11. MÉTODO

Se utiliza la ecuación de **CUC (coeficiente de Uniformidad de Christiansen)**, ya que es la metodología que más se utiliza en sector agrícola de riego y que estadística mente representa la desviación media estándar de los valores promedio de las precipitaciones.

Con esto se puede evaluar el perfil del comportamiento hidráulico a lo largo de la línea de riego, así como los valores del gasto residual (gasto recibido en los botes del suelo) y, es una clara visión estadística entre el gasto descargado hidráulicamente con base en una presión unitaria contra un receptor.

Dicha metodología involucra medir los gastos de cada boquilla a lo largo del pivote central a un gasto constante y una presión constante ya que este valor es el mismo en las 5 pruebas.

La medición del gasto en el suelo es a través de un conjunto de bote receptores con la misma área (107.51 mm<sup>2</sup>).

Se aforan las descargas después de la prueba, ya que esto se realizó en la misma velocidad del pivote.

El factor más importante de este método es realizar la prueba cuando se tiene una tendencia de velocidad de viento, para la cual se utiliza un anemómetro digital, que grafica la velocidad promedio que se presentó durante la prueba.

Los datos se concentraron en una base de datos donde el testigo son velocidades por debajo de 5 kph y el crítico se ha presentado velocidades por encima de 20 kph.

La evaluación de este método consiste en observar el porcentaje de variación en el riego con respecto a la variación del viento (CUC/kph).

Esta metodología, el gasto, presión y velocidad de avance del pivote permanecen constantes.

Con respecto a la prueba de contenido de humedad del suelo, después de 4 horas de drenado se mide el porcentaje de humedad en el mismo punto donde se estableció la prueba de descarga. Comparado con el resultado de la velocidad de infiltración de la prueba de la velocidad de infiltración del suelo.

Al término de estas evaluaciones se puede encontrar estadísticamente la eficiencia de aplicación y requerimiento del porcentaje de humedad con respecto a la descarga en base a la velocidad del viento.

A continuación, se describe los tiempos y movimientos de esta metodología.

### **11.1. VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (CILINDROS INFILTRÓMETROS)**

Buscar las zonas en que se hará la prueba de velocidad de infiltración.

Poner el cilindro grande sobre el terreno marcado y después el otro dentro del mismo, marcar la circunferencia para poder cavar un poco en línea de la marca.

Cavar a una profundidad de 30-40 cm en cilindro grande y cilindro chico 20 cm, según sean los cilindros.

Colocar los cilindros y colocar la tierra bien a borde de piso junto al cilindro este deben estar nivelados los dos uno al otro.

Colocar agua en una bolsa, el volumen que sea el mismo volumen que está del piso al borde del cilindro chico. Colocarlo dentro del cilindro chico.

Colocar una regla dentro del cilindro chico que rebase el borde.

Aplicar agua al cilindro grande hasta el borde.

Romper la bolsa del cilindro chico para que salga el agua dentro de él, en un lapso de 2 min después de aplicar el agua al cilindro grande.

Tomar varias tomas con respecto tiempo/infiltración cada 5 min.

Al terminar el agua dentro del cilindro chico aplicar más y tomar tiempo cero para otras muestras más.

## **11.2. CONTENIDO DE HUMEDAD (LABORATORIO Y CAMPO)**

Ubicar el punto donde se tomó la pluviometría en punto piso

Dejar pasar a menos 4 horas para poder tomar la muestra de prueba de suelo

Colocar la barrena de muestra en el suelo y girar para sus penetraciones en él

Sacar muestras de terreno hasta llegar a un punto de 25-40 cm de profundidad

La muestra que se tomará será la de 25-40 cm

Colocarla en bolsas de plástico y enumerarlas según la distancia al punto pivote

Llevarla al laboratorio para analizar su contenido de humedad

Pesar los botes de aluminio solos, con tierra (muestra)

Coloca en la estufa de secado durante 24 hrs a 120 °C

### **11.3. GASTO POR UNIDAD DE EMISOR (COLECTOR EN EMISOR)**

Colocar la manguera en la punta del garrafón o botella

Ponerle cinta para no derrapar agua

Colocarla a la probeta volumétrica el otro extremo de la manguera

Introducir el emisor en la boca del garrafón para hacer la toma de caudal, esto se repite 2 veces en cada emisor para así tener la media acertada

Medir el tiempo en que se llenó la probeta hasta un punto de 2 litros

Hacer esto en todos los emisores de la lateral del pivote al igual en el voladizo

### **11.4. PLUVIOMETRÍA EN PUNTO SUELO (COLECTORES)**

Ubicar el punto donde se tomará la muestra de pluviometría a cada 13 m de preferencia en centro del radio del emisor

Hacer una perforación en el suelo según sea el recipiente de profundidad con la pala

Colocar el recipiente y ajustarlo bien con tierra para prevenir que el viento lo mueva de su lugar

Dejar que pase el pivote por completo aplicando la pluviometría en el recipiente

Después de haber pasado el pivote por ese punto, evaluar el gasto o volumen que recolecto el recipiente

Pone en la probeta volumétrica y ver el volumen aplicado en ese punto

## **11.5. VELOCIDAD DEL VIENTO**

Buscar un punto para colocar la base donde se colocara el anemómetro

Penetrar el suelo con la barra o estaca

Colocar el anemómetro en la base

Tomar una prueba para ver que haya quedado bien calibrado y puesto

Tomar pruebas cada 10-15 min durante la prueba de pluviometría

## **12. MATERIALES**

### **12.1. DESCRIPCIÓN POR VARIABLE DE PROCEDIMIENTO**

#### **12.1.1. VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN**

2 Cilindros infiltrómetro	Bolsa de plástico
Pala de escarbar (pico)	Libreta y pluma
Talache o pico.	Marro
Regla métrica	Nivel de mano
Manómetro o reloj de mano.	Agua según el volumen de los cilindros.

#### **12.1.2. CONTENIDO DE HUMEDAD PW.**

Estufa de secado (laboratorio)	Cuchillo para sacar la muestra de la
Botes de aluminio para muestras	barrena
Barrena para muestras	Regla métrica
Bolsa de plástico para guardar la	Balanza de precisión
muestra	Material para apuntar datos

### **12.1.3. GASTO POR UNIDAD DE EMISOR**

Garrafón de 20 lts con boca ancha	Reloj o aparato de medición de tiempo
Manguera de 1 – ¾ inch	
Probeta volumétrica de 2 lts	Material de apunte
Cinta de aislar	Material para protección del agua

### **12.1.4. PLUVIOMETRÍA EN PUNTO PISO**

Botes de aluminio o plástico con diámetro mayor a 10 cm	Material para apuntar datos
	Pala de pico
Probeta volumétrica	

### **12.1.5. VELOCIDAD DEL VIENTO**

Anemómetro	Material para apuntar datos
Barra de sentado para el anemómetro	Cinta métrica

### 13. METODOLOGÍA

El proyecto de investigación se llevó acabo en la sierra de Arteaga Coahuila en el portal San Antonio, región montañosa, ubicada en el kilómetro 6.57 de la carretera a San Antonio de las alazanas, en el rancho las 4 Milpas. Coordenadas UTM siguientes:



A screenshot of a web-based form for entering UTM coordinates. The form has a light beige background and a thin border. It contains four input fields with labels to their left: 'Nombre:' with the value 'evalaución pivote', 'Zona:' with the value '14 R', 'Coordenada Este:' with the value '325101.00 m E', and 'Coordenada Norte:' with the value '2801802.00 m N'. A small yellow pushpin icon is located to the right of the 'Nombre:' field.

- 1.- Como primer paso se realiza un estudio del tipo de suelo con el fin de poder saber la infiltración que tiene para llegar a su infiltración básica, en dicho estudio está presente la textura para poder determinar la cantidad de porosidad y retención de agua en su interior, Velocidad de Infiltración Básica con los cilindros infiltrómetros y utilizando la ecuación de Kostiakov para determinar la velocidad de infiltración, así como la taza de precipitación máxima que puede tolerar este suelo.
- 2.- Se evalúa en campo la tasa de precipitación de los aspersores o rociadores llamándolos gasto hidráulico que se entenderá como el gasto que descarga una boquilla debido a su presión.
- 3.- Se evalúa el gasto que realmente se precipita en el suelo para poder determinar el gasto que se perdió por el efecto del viento a diferentes velocidades de viento.
- 4.- Contenido de humedad para determinar cuánta agua es la que se infiltra con la pluviometría que cae a diferentes velocidades del viento.

## **14.RESULTADOS**

Esta evaluación técnica del pivote central se desarrolló en el periodo del día 9 de noviembre al 27 febrero del 2018 en la región del portal San Antonio, región montañosa, ubicada en el kilómetro 6.57 de la carretera a San Antonio de las alazanas, coordenadas UTM. En el rancho Las 4 Milpas.

El origen de los suelos proviene de rocas sedimentarias calizas y corresponde a suelos litosol y rendiza, con textura media (Cetenal, 1976a; Cetenal, 1976b). El clima en el municipio es de tipo semiseco - semicálido, con ligeras variaciones según la altitud; el noreste y sureste se encuentra dentro del subgrupo de climas semi - fríos; la temperatura media anual es de 12°C a 16°C; la precipitación media anual se encuentra en el rango de los 400 a 500 milímetros con régimen de lluvias en los meses de mayo, junio, julio, noviembre y enero; los vientos prevalecientes tienen dirección noreste con velocidad de 15 a 20 kph anuales (Mendoza 1983).

A continuación, se muestran los datos recabados en campo del pivote central evaluado

### **14.1. VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN**

La fórmula obtenida con el modelo obtenido de Kostiakov-Lewis, se puede calcular la velocidad de infiltración en un tiempo determinado y obtenerse valores ajustados:

Kostiakov, en 1932 (Ravi y Williams, 1998) propuso las siguientes ecuaciones de carácter empírico para estimar la tasa de infiltración y la infiltración acumulada

**Infiltración Promedio de Muestra Pivote El Portal San Antonio 325101.00 m E 2801802.00 m N**

Tiempo (min)	Dif. Lectura (cm)	Tiempo acumu.	Vel. de inf. (cm/mi)	Inf. acumu. cm	log x	log y	x.y	x^2
0	0	0		0				
2	0.3	2	9	9	0.301	0.954	0.287	0.091
2	0.2	4	6	15	0.602	0.778	0.468	0.362
2	0.1	6	3	18	0.778	0.477	0.371	0.606
5	0.3	11	3.6	21.6	1.041	0.556	0.579	1.084
5	0.2	16	2.4	24	1.204	0.380	0.458	1.450
5	0.2	21	2.4	26.4	1.322	0.380	0.503	1.748
10	0.2	31	1.2	27.6	1.491	0.079	0.118	2.224
10	0.4	41	2.4	30	1.613	0.380	0.613	2.601
10	0.4	51	2.4	32.4	1.708	0.380	0.649	2.916
				<b>Suma</b>	<b>10.061</b>	<b>4.366</b>	<b>4.047</b>	<b>13.082</b>

Vel = velocidad      inf = infiltración      acumu = acumulado      dif = diferencia

Suma x^2	N	n	y media	x media	m	log m	k
101.22	9	-0.4537	0.485	1.118	-0.022	0.9504	8.9215

Ecuación de la infiltración			
Tiempo min	60	1.39215732	cm/horas

**Tabla 1.** Resultados de los datos de campo de la velocidad de infiltración.

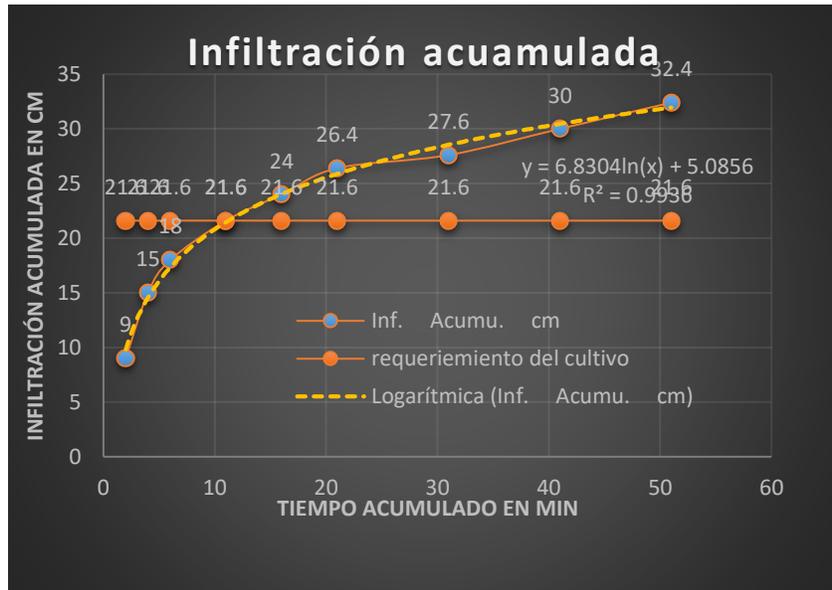
En la curva de infiltración con comportamiento descendiente podemos apreciar que según la textura del suelo puede tener una infiltración muy buena, ya que a un tiempo determinado acumulado alcanza el % de diferencias de cargas es aceptable según Kostiakov que es un 10 % para así llamarla infiltración básica. Esto nos indica que después de una lámina de riego que exceda los 30 cm, esta tendera a tener un encharcamiento.

Con la ecuación derivada de Kostiakov y Lewis podemos calcular la infiltración a tal tiempo, obtenida de los datos aportados en campo.

$$F = K * T^{-n}$$

$$F = 8.9215 * T^{-(-0.4537)}$$

## 14.2. INFITRACIÓN CUMULADA



**Gráfico 1.** Curva de velocidad de infiltración acumulada.

Dados los resultados de la infiltración y después de hacerlo un acumulado de lámina y tiempo, nos da como resulta, en este tipo de suelo podemos tener cultivos que no rebasen esta lamina básica, pero igual podemos ver las lecturas para así tomar un tiempo de riego y no aplicar más del contenido de humedad requerido, ejemplo:

Para un cultivo que requiere de 24 a 26 cm de lámina, este tendrá un tiempo de riego de 21 min.

### Datos del pivote

Pivote Velocidad del viento 26 Kph en testigo y mayores en evaluaciones

Inicio de la evaluación 9 de noviembre del 2018

Velocidad de avance 30 % dada en punto de control

Velocidad de avance en ultima torre 27.21 mts /Hora = 2.6 días /360 grados

Con una relación de 4.7124 mts/ Grado

Región de San Antonio de las Alazanas.

En el rancho Las 4 Milpas.

### **14.3. CÁLCULO DE LA TAZA DE PRECIPITACIÓN EN mm**

La tasa de precipitación la aporta el equipo de riego como una acción mecánica hidráulica dependiendo del tiempo que dure regando sobre un punto determinado, tiene que ver mucho el porcentaje de avance del pivote según la lámina que se quiera aplicar, pero esta no debe de ser mayor que la velocidad de infiltración del suelo, ya que si es mayor esta tendría lo que es llamado escorrentías o encharcamientos y a veces la percolación.

Los datos de las tablas 2 siguientes son en base al testigo a una velocidad de viento 5 kph.

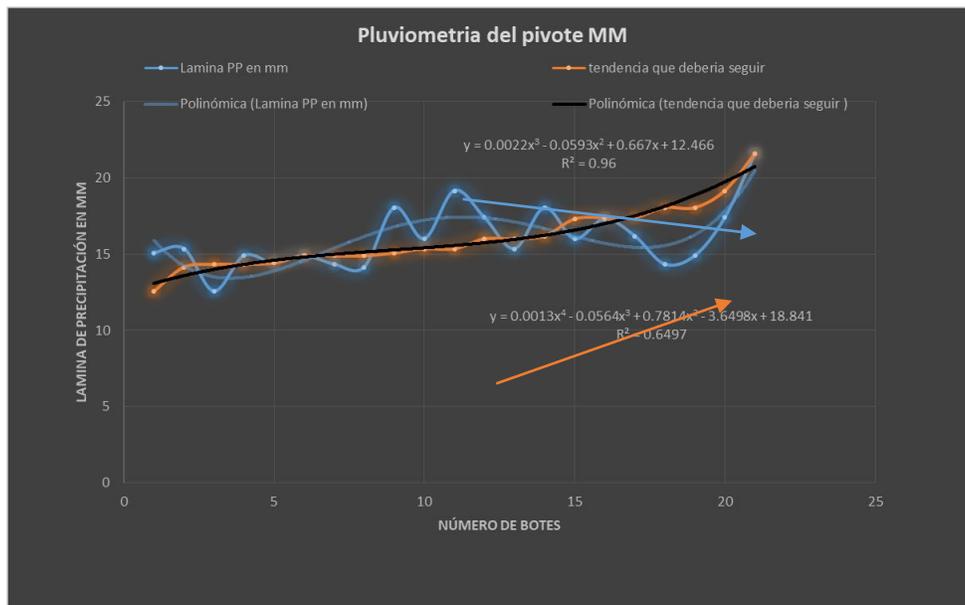
# Bote	Q recolectado cm3	A. de bote	Lámina PP en mm	Distancia	# Torre
1	162	107.513406	15.06836573	26	Torre 1
2	165	107.513406	15.34740954	39	Torre 1
3	135	107.513406	12.55697144	52	Torre 1
4	160	107.513406	14.88233653	65	Torre 2
5	155	107.513406	14.41726351	78	Torre 2
6	160	107.513406	14.88233653	91	Torre 2
7	154	107.513406	14.32424891	104	Torre 2
8	152	107.513406	14.1382197	117	Torre 3
9	194	107.513406	18.04483304	130	Torre 3
10	172	107.513406	15.99851177	143	Torre 3
11	206	107.513406	19.16100828	156	Torre 4
12	187	107.513406	17.39373082	169	Torre 4
13	165	107.513406	15.34740954	182	Torre 4
14	194	107.513406	18.04483304	195	Torre 5
15	172	107.513406	15.99851177	208	Torre 5
16	186	107.513406	17.30071621	221	Torre 5
17	174	107.513406	16.18454097	234	Torre 6
18	154	107.513406	14.32424891	247	Torre 6
19	160	107.513406	14.88233653	250	Torre 6
20	187	107.513406	17.39373082	263	Voladizo
21	232	107.513406	21.57938796	276	Voladizo

**Tabla 2.** Datos recabados para el gráfico de la pluviometría 5 kph.

$$T_{pp} = \left( \frac{Q}{\left( \frac{A}{10} \right)} \right)$$

Q= caudal recolectado en el pluviómetro en cm<sup>3</sup>

A= área calculada del pluviómetro dividido de 10



**Gráfico 2.** Curva de comportamiento de pluviometría a 5 kph.

El Cuadro 1 se presenta las características del equipo en términos de superficie, caudales y las alturas medias ponderadas recogidas por tramo en los pluviómetros, correspondientes al promedio de las evaluaciones realizadas. Presenta, además, la altura de agua media recogida para el equipo de 16.67 mm promedio en una infiltración del suelo de 13.92. Una representación gráfica de lo que ocurre a lo largo de la unidad respecto a las alturas de agua recogidas por los pluviómetros (Ar). En ésta se observa que los tramos 1 y 2 reciben menos agua que la media, mientras que lo contrario sucede

con los tramos 3 y 4. En el tramo 4 y voladizo es donde se aprecian las menores diferencias con respecto a la media.

Dado el gráfico del comportamiento de pluviometría en punto suelo, ésta nos indica que la tasa de precipitación no es buena, ya que no cumple con el régimen de diseño de un pivote central, el cual el gasto recolectado en cada pluviómetro debería ir aumentando conforme se aleje del punto pivoto, cosa que no se cumple en algunos emisores.

#### **14.4. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE CHRISTIANSEN**

El coeficiente de uniformidad de Christiansen es ampliamente usado, y un CUC igual o mayor que 0.7 es considerado aceptable en la práctica del diseño de sistemas de riego por aspersión.

Fue desarrollado por Christiansen (1942). Es una representación estadística de la uniformidad, utilizado principalmente en los sistemas de aspersión; es el parámetro de uniformidad de uso más generalizado. Se expresa en porcentaje.

Número	Lámina Precp. en mm	$\bar{y}$	$Y_i - \bar{y}$	Distancia
21	32.6208415	24.08	8.54084147	26
11	28.9650575	24.08	4.88505751	39
9	27.2777726	24.08	3.19777261	52
14	27.2777726	24.08	3.19777261	65
12	26.2935231	24.08	2.21352308	78
20	26.2935231	24.08	2.21352308	91
16	26.152916	24.08	2.07291601	104
17	24.4656311	24.08	0.3856311	117
10	24.184417	24.08	0.10441695	130
15	24.184417	24.08	0.10441695	143
2	23.2001674	24.08	0.87983257	156
13	23.2001674	24.08	0.87983257	169
1	22.7783462	24.08	1.3016538	182
4	22.497132	24.08	1.58286795	195
6	22.497132	24.08	1.58286795	208
19	22.497132	24.08	1.58286795	221
5	21.7940967	24.08	2.28590333	234
7	21.6534896	24.08	2.4265104	247
18	21.6534896	24.08	2.4265104	250
8	21.3722754	24.08	2.70772455	263
3	18.9819552	24.08	5.09804483	276
<b><math>\Sigma</math> Sumatoria</b>	<b>509.841255</b>		<b>49.6704877</b>	
<b>Promedio</b>	24.278155			

**Tabla 3.** Datos para el cálculo del CUC 5 kph.



# Bote	Distancia	Pw kohms	Pw req.		
			Por planta.	A. total	Rangos
21	-276	-9	-4.5	11.96	3.54-3.62
11	-263	-7.51	-4.5	7.345	3.62-4.25
9	-250	-7.36	-4.5	3.25	4.25-4.25
14	-247	-7.36	-4.5	0.8125	4.25-4.5
12	-234	-7.01	-4.5	0.65	4.5-4.7
20	-221	-6.3	-4.5	2.6	4.7-4.7
16	-208	-6.3	-4.5	3.12	4.7-4.78
17	-195	-6.3	-4.5	3.9	4.78-4.82
10	-182	-6	-4.5	5.72	4.82-5.06
15	-169	-5.84	-4.5	10.79	5.06-5.6
2	-156	-5.84	-4.5	15.86	5.6-5.84
13	-143	-5.6	-4.5	17.42	5.84-5.84
1	-130	-5.06	-4.5	18.46	5.84-6
4	-117	-4.82	-4.5	21.45	6-6.3
6	-104	-4.78	-4.5	23.4	6.3-6.3
19	-91	-4.7	-4.5	23.4	6.3-6.3
5	-78	-4.7	-4.5	28.015	6.3-7.01
7	-65	-4.25	-4.5	34.905	7.01-7.36
18	-52	-4.25	-4.5	8.58	7.36-7.36
8	-39	-3.62	-4.5	38.155	7.36-7.51
3	-26	-3.54	-4.5	48.815	7.51-7.9

**Tabla 4.** Datos recabados de Pw con el método gravimétrico.

$$\sum A \text{ zona I} = \sum A \leq (4.5) - \sum A \text{ zona II}$$

$$\sum A \text{ zona II} = \sum A \leq (4.5) - (-\sum A \text{ zona II} + \sum A \leq (4.5))$$

$$\sum A \text{ zona III} = \sum A(4.5 \leq 9) - \sum A \text{ zona IIII}$$

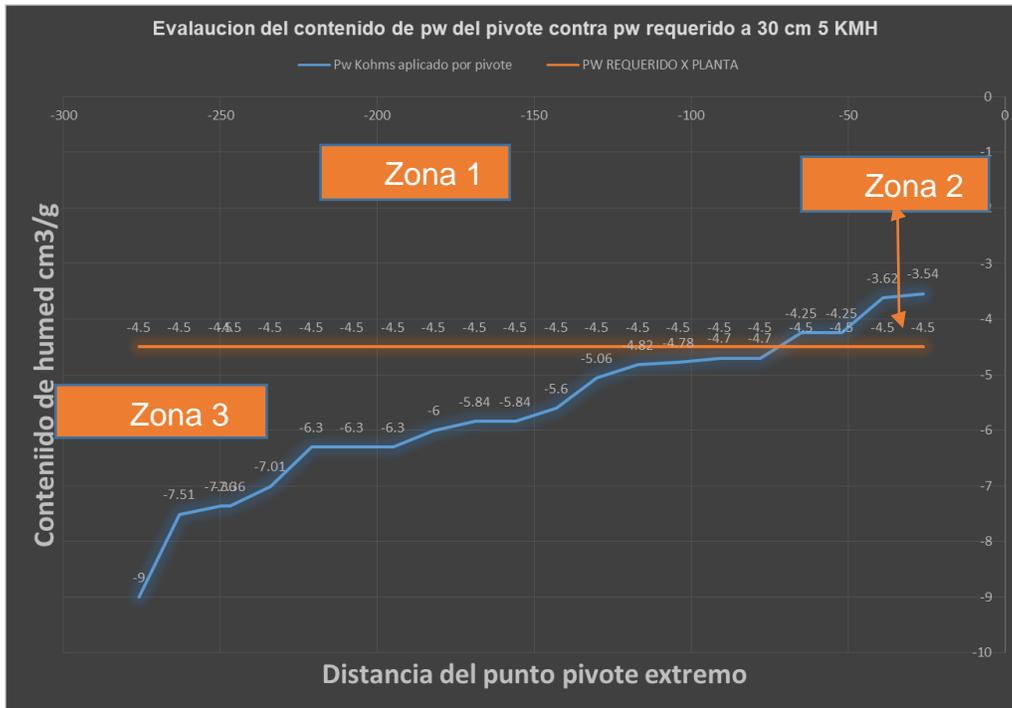
$$Ea = \left( \frac{\sum A \text{ zona I}}{\text{Zona III}} \right) * 100$$

$$Ea = \left( \frac{1101.6325}{305.24} \right) * 100$$

$$Er = \left( \frac{\sum A \text{ zona I}}{\text{Zona II}} \right) * 100$$

$$Er = \left( \frac{1101.6325}{23.3675} \right) * 100$$

<b>SUMATORIAS I</b>	<b>1101.6325</b>
SUMATORIAS II	23.3675
SUMATORIAS III	305.24
Ea %	78.3036487
Er %	97.9228889



**Gráfico 3.** Curva de contenido de humedad y requerimiento de la planta.

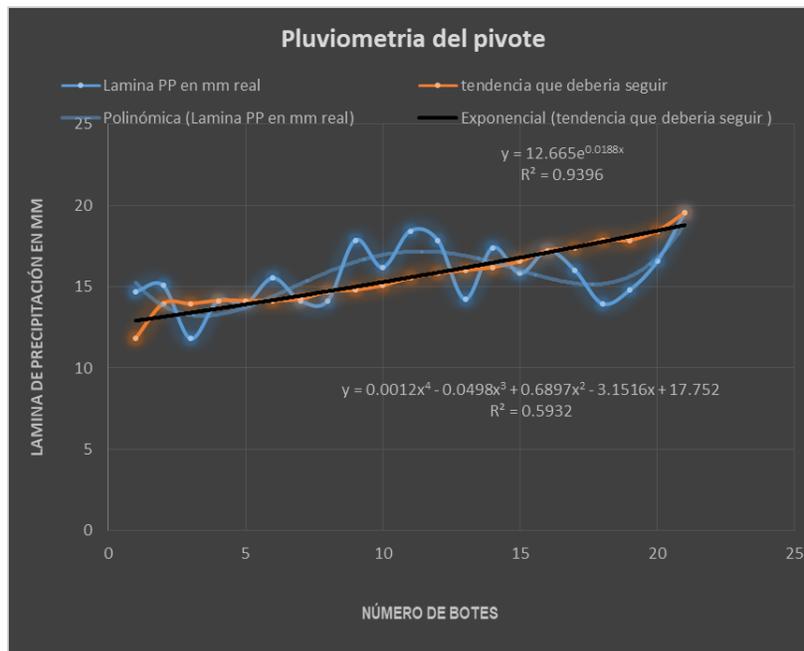
Dados los datos de la tabla y graficándolos, podemos ver el comportamiento que tiene el pivote central a lo largo de su lateral y con efectos del viento, siendo así se asume que tiene una buena eficiencia de requerimiento, ya que es muy poco el terreno que no cubre con la lámina o contenido de humedad requerido por la planta teniendo una Er del 97.92 % de aplicación del área de requerimiento.

En cuanto a la eficiencia de aplicación se puede decir que está en un punto medio, ya que según Christiansen dice que siendo mayor de 70 % se considera como aceptable, este tiene una Ea de 78.3 que es un promedio muy bajo pero aceptable, ya que debería de andar en una Ea de 85-90 %, pero es tolerable por lo dicho en literatura con base en los estudios en otros pivotes centrales.

A continuación, se presentan las gráficas de las pruebas tomadas a diferentes velocidades del viento.

## 14.6. GRÁFICAS A DIFERENTES VELOCIDADES

### 14.6.1. GRÁFICAS A 10 KPH



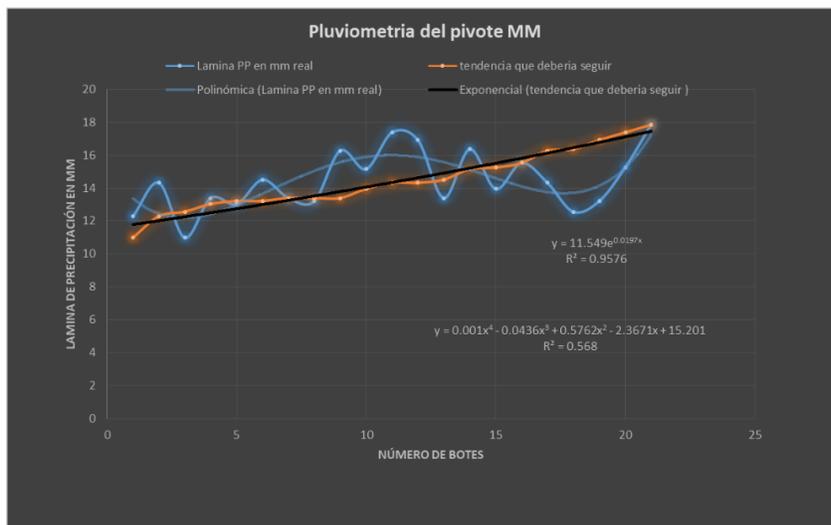
**Gráfico 4.** Curva de comportamiento de pluviometría a 10 kph.



**Gráfico 5.** Curva de contenido de humedad y requerimiento de la planta.

<b>SUMATORIAS 1</b>	<b>1094.255</b>
SUMATORIAS 11	30.745
SUMATORIAS 111	333.605
Ea %	76.6360147
Er %	97.2671111

### 14.6.2. GRÁFICAS A 15 KPH



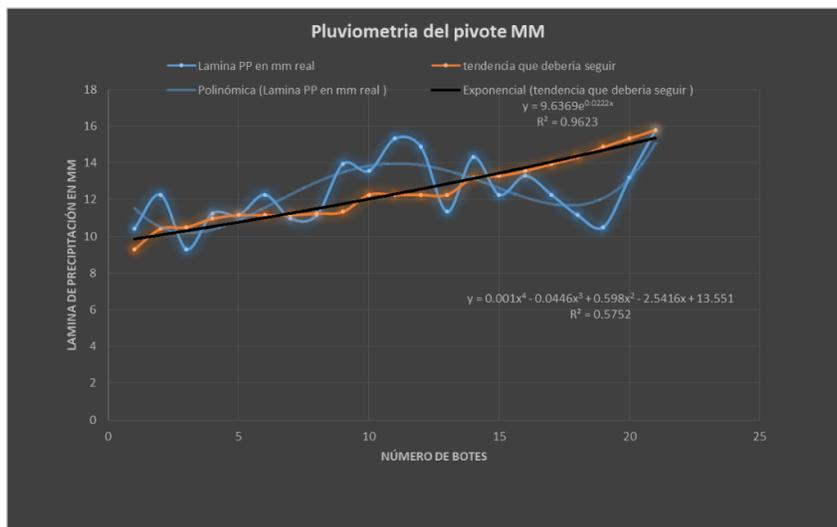
**Gráfico 6.** Curva de comportamiento de pluviometría a 15 kph.



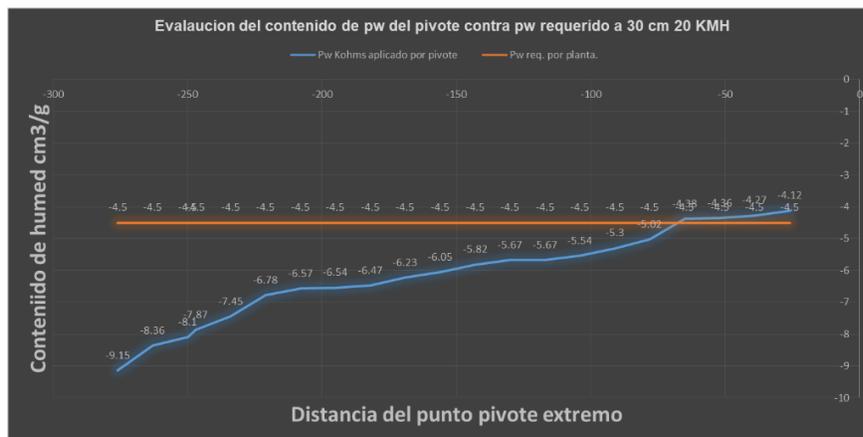
**Gráfico 7.** Curva de contenido de humedad y requerimiento de la planta.

<b>SUMATORIAS 1</b>	<b>1104.1675</b>
SUMATORIAS 11	20.8325
SUMATORIAS 111	332.155
Ea %	76.8746225
Er %	98.1482222

### 14.6.3. GRÁFICAS A 20 KPH



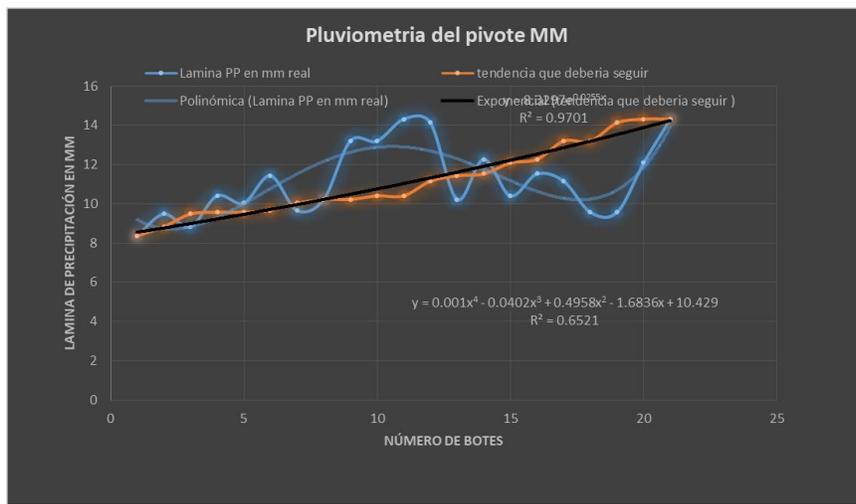
**Gráfico 8.** Curva de comportamiento de pluviometría a 20 kph.



**Gráfico 9.** Curva de contenido de humedad y requerimiento de la planta.

<b>SUMATORIAS 1</b>	<b>1118.3375</b>
SUMATORIAS 11	6.6625
SUMATORIAS 111	407.735
Ea %	73.2820688
Er %	99.4077778

#### 14.6.4. GRÁFICAS A 25 KPH



**Gráfico 10.** Curva de comportamiento de pluviometría a 26 kph.



**Gráfico 11.** Curva de contenido de humedad y requerimiento de la planta.

<b>SUMATORIAS 1</b>	<b>1125</b>
SUMATORIAS 11	0
SUMATORIAS 111	514.695
Ea %	68.6103208
Er %	100

Como podemos ver en las gráficas presentes en la parte de este apartado (resultados), al comparar nuestras evaluaciones con el testigo, vemos que conforme aumenta la velocidad del viento los valores de **Er** aumentan y la **Ea** disminuye, pero esto ocurre hasta una velocidad arriba de los 16 kph, ya que por debajo de este las variaciones no son muy representativas, con respecto a un punto de requerimiento de 4.5 Kohms de contenido de humedad, se ve revelado en cada una de las velocidades medidas, ejemplo del testigo a un punto medio de 5 – 15 los resultados de estas variables son casi constantes, pero al compararlos con el de 25 km se dispara mucho el cambio.

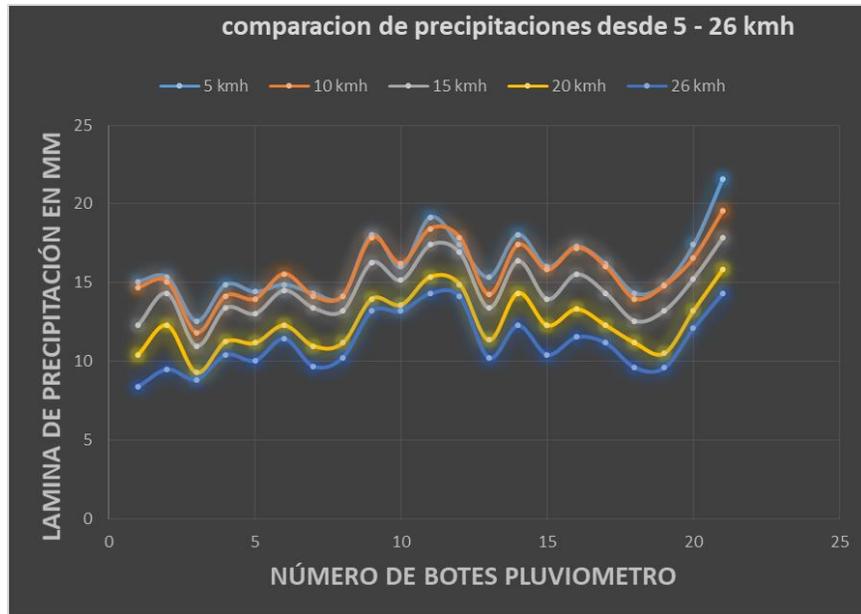
Ea % 5 kph	78.3036487
Er	97.9228889

Ea % 15 kph	76.8746225
Er %	98.1482222

Ea % 5 kph	78.3036487
Er	97.9228889

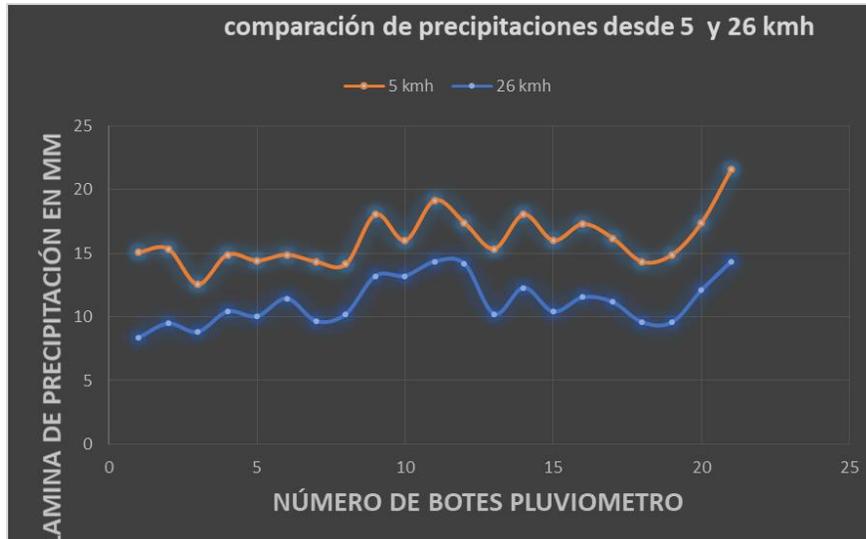
Ea % a 26 kph	68.6103208
Er %	100

Con respecto a la pluviometría se puede decir que esta es la variable que demanda cuánta agua es la que cae el punto suelo, en el cual podemos ver en el gráfico 13 que a más velocidad esta disminuye conforme aumenta la velocidad del viento. Pero esta no se pierde, solo se coloca en otro punto de la lateral del pivote, esto es según la dirección del viento.

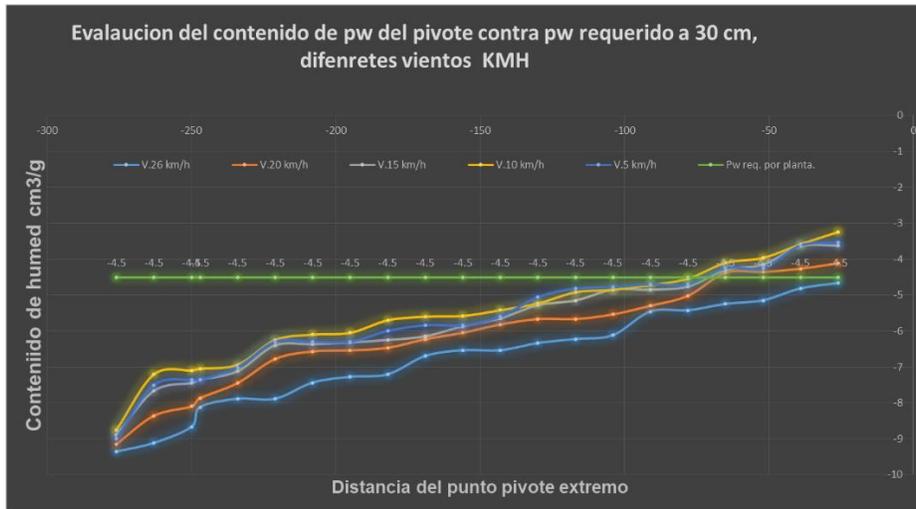


**Gráfico 12.** Comparación de las láminas de pluviometría en mm

Diferencias entre el testigo a 5 kph y el mayor viento evaluado a 26 kph.



**Gráfico 13.** Diferentes láminas del testigo a comparación de velocidad máxima.



**Gráfico 14.** Comportamiento de  $P_w$  a diferentes velocidades del viento.

Relación de los diferentes contenidos de humedad recabados a diferentes velocidades del viento, esto nos indica que entre más rápida sea la velocidad del viento, la eficiencia de aplicación disminuye y la eficiencia de requerimiento aumenta, como lo podemos ver en la gráfica.



**Gráfico 15.** Comportamiento del pivote cuando el requerimiento  $P_w$  es de 9.36 Kohms.

Un escenario muy crítico sería cuando no caiga ninguna lluvia o algo en lo común que pueda aplicar agua al suelo para ayudar al sistema pivote central a cumplir con los requerimientos de él con contenido de humedad más grande a mayor profundidad, en la gráfica podemos observar que el máximo contenido es 9.36 **Kohms**, el cual el pivote no cumplirá con dicho requerimiento, esto dividido a la mala calibración y selección de las boquillas, en este escenario el pivote tendrá una:

<b>Ea %</b>	<b>100</b>
<b>Er %</b>	<b>76.965962</b>

## 15. CONCLUSIONES

A lo largo del desarrollo de este trabajo, se pudo observar el comportamiento de la tasa de precipitación con respecto al gasto residual y de humedad, como se pueden observar en las tablas (5, 8 Y 11) y figura (3, 5, 7, 9 Y 11) en base a esto si se observa el comportamiento de la última gráfica en donde el pivote funciona con vientos aciclonados y máximo requerimiento de humedad, la eficiencia de aplicación sería del 100 % contra una eficiencia de requerimiento del 76 % que es un valor bajo, dado los altos costos que involucran el bombeo de este tipo de sistemas.

Con esto podemos concluir que la hipótesis planteada es cumplida, ya que el viento es el factor que más afecta a los sistemas de riego por aspersión, en el cual sus efectos como tal se empiezan a ver o distorsionar hasta que se cumple hasta llegar a vientos aciclonados mayores a 16 **kph**, aquí es donde se empiezan a ver las diferencias mayores con respecto al CUC,  $E_a$  y  $E_r$  de un 10% permitido se va a variar a un 30 % o más, esto con respecto al testigo.

En las tablas 5 -10 están representados los datos recabados durante las pruebas a diferentes velocidades, en el cual se incluyen lo que son datos para cálculo de (pluviometría, CUC, y contenido gravimétrico), en los cuales los cambios se comportan en forma descendientes por causa del fenómeno viento, en el que se observaron los cambios desde el cálculo de CUC del testigo hasta la prueba a mayor velocidad del viento. Podemos ver en la tabla # 6 un CUC de 90.92 % en cambio en la tabla # 14 se observa de 57.39, se estima una variación casi de 50 % de este CUC.

## **16.RECOMENDACIONES**

Con base en las conclusiones de este trabajo se puede observar en el comportamiento de las descargas de las boquillas que están mal calibradas y así mismo se requiere que el tamaño de gota sea un poco más pesado, ya que actualmente genera una nebulización incidente que provoca esta disparidad en el riego

## **17.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS**

Barrios de León Edwin Anacleto. (2018). Evaluación de velocidades de funcionamiento del sistema de riego pivote central fijo en manejo convencional de caña de azúcar.pdf

Becerra, F., & Francisco, C. (1995). Diseño, manejo y evaluación del pivote central y sus perspectivas para Chile. Proyecto de Título. Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción Chillan, Chile.

Briones Sánchez Gregorio e Ignacio García Casillas. (1986). Diseño y evaluación de sistemas de riego por aspersión y goteo, Editada por la UAAAN. Pag.183-196.

Cárdenas, J. F. (2000). Estudio del uso de la boquilla difusora cubana en las máquinas de riego de pivote central, Tesis (en opción al título de Master en Riego y Drenaje), La Habana, Cuba.

Decker G.J. (1953). Application of soil moisture characteristic curve, agriculture engineering.

Martínez, J.; Sánchez, J. Serrano, I. (2001). Evaluación del sistema de riego por aspersión en pivote central, instalado en Chapingo México. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, México. 14 p.

Mena, M.H., Tijerina, C.L., Acosta, H.R. (2010). Evaluación técnica y económica del manejo de equipos de pivote central Terra Latinoamericana, vol. 28, núm. 2, abril-junio, 2010, pp. 177-184 Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.

Moreno, R. G. (2016). Tesis: Evaluación hidráulica del riego mecanizado tipo pivote central. UAAAN Saltillo, Coahuila, junio 2016.

Moreno, R. G. (2016). Tesis: Evaluación hidráulica del riego mecanizado tipo pivote central. Pdf.

Shockley, D.R. (1955). Capacity of soil to hold moisture, agricultural engineering

Shockley, D.R. (1955). Uniformity coefficient for different sprinkler discharge profiles and spacing along main (Sm). (216, 225).

Shockley, D.R. (1983). Uniformidad del coeficiente humedad en pivotes centrales. Third printing.pag 216 - 219.

Rivera García María de Lourdes. (2017). Evaluación de la eficiencia de riego de un equipo pivote central y su relación con el consumo de energía eléctrica en bombeo.pdf

## **Citas vistas en páginas web**

Brenner Javier. Historia pivote. Consultado en:

<http://pivotes.blogspot.com/p/historia.html> consultado (15/08/2018).

Traxco.es. (2009). Pivotes de riego/reguladores de presión para pivót.

Recuperado en <https://www.traxco.es/>

Tema 8. El pivót. Descripción del equipo. Citado en el link

<http://lan.inea.org:8010/web/materiales/web/riego/temas/tema8/pivot.htm>

Los antecedentes históricos de la región de Arteaga Coahuila México, puestos en el apartado de métodos, fueron citados de la página web.

<http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM05coahuila/municipios/05004a.html>

## 18. ANEXOS

### Datos de Prueba a 10 kph

# Bote	Q recolectado cm3	A. de bote	Lámina PP en mm	Distancia	# Torre
1	158	107.513406	14.6963073	26	Torre 1
2	162	107.513406	15.0683657	39	Torre 1
3	127	107.513406	11.8128546	52	Torre 1
4	152	107.513406	14.1382197	65	Torre 2
5	150	107.513406	13.9521905	78	Torre 2
6	167	107.513406	15.5334387	91	Torre 2
7	152	107.513406	14.1382197	104	Torre 2
8	152	107.513406	14.1382197	117	Torre 3
9	192	107.513406	17.8588038	130	Torre 3
10	174	107.513406	16.184541	143	Torre 3
11	198	107.513406	18.4168915	156	Torre 4
12	192	107.513406	17.8588038	169	Torre 4
13	153	107.513406	14.2312343	182	Torre 4
14	187	107.513406	17.3937308	195	Torre 5
15	170	107.513406	15.8124826	208	Torre 5
16	185	107.513406	17.2077016	221	Torre 5
17	172	107.513406	15.9985118	234	Torre 6
18	150	107.513406	13.9521905	247	Torre 6
19	159	107.513406	14.7893219	250	Torre 6
20	178	107.513406	16.5565994	263	Voladizo
21	210	107.513406	19.5330667	276	Voladizo

**Tabla 5.** Datos de prueba a 10 kph

<b>Lámina</b>				
<b>Número</b>	<b>Precp. en mm</b>	<b><math>\bar{y}</math></b>	<b><math>Y_i - \bar{y}</math></b>	<b>Distancia</b>
21	21.6534896	24.08	2.4265104	26
11	21.6534896	24.08	2.4265104	39
9	21.3722754	24.08	2.70772455	52
14	19.9662047	24.08	4.11379531	65
12	19.9662047	24.08	4.11379531	78
20	18.5601339	24.08	5.51986606	91
16	18.2789198	24.08	5.80108021	104
17	17.4352773	24.08	6.64472266	117
10	17.2946703	24.08	6.78532974	130
15	16.872849	24.08	7.20715096	143
2	15.7479924	24.08	8.33200757	156
13	15.7479924	24.08	8.33200757	169
1	15.4667783	24.08	8.61322172	182
4	15.4667783	24.08	8.61322172	195
6	15.1855641	24.08	8.89443587	208
19	14.6231358	24.08	9.45686417	221
5	14.4825288	24.08	9.59747124	234
7	14.4825288	24.08	9.59747124	247
18	14.3419217	24.08	9.73807832	250
8	13.3576722	24.08	10.7223278	263
3	12.6546368	24.08	11.4253632	276
	<b>354.611044</b>		<b>151.068956</b>	
media	16.8862402			

**Tabla 6.** Datos para el cálculo del CUC 10 kph.

<b>CUC %</b>	<b>90.2634307</b>	<b>CUC lpp 5 kph</b>	<b>90.1194307</b>
--------------	-------------------	----------------------	-------------------

# Bote	Distancia	Pw	
		Kohms aplicado por pivote	Pw req. Por planta.
21	-276	-8.76	-4.5
11	-263	-7.21	-4.5
9	-250	-7.1	-4.5
14	-247	-7.05	-4.5
12	-234	-6.94	-4.5
20	-221	-6.25	-4.5
16	-208	-6.1	-4.5
17	-195	-6.05	-4.5
10	-182	-5.7	-4.5
15	-169	-5.6	-4.5
2	-156	-5.58	-4.5
13	-143	-5.42	-4.5
1	-130	-5.23	-4.5
4	-117	-4.92	-4.5
6	-104	-4.85	-4.5
19	-91	-4.72	-4.5
5	-78	-4.54	-4.5
7	-65	-4.1	-4.5
18	-52	-3.96	-4.5
8	-39	-3.58	-4.5
3	-26	-3.24	-4.5

**Tabla 7.** Datos recabados de Pw con el método gravimétrico 10 kph

**Datos de Prueba a 15 kph**

<b># Bote</b>	<b>Q recolectado cm3</b>	<b>A. de bote</b>	<b>Lámina PP en mm</b>	<b>Distancia</b>	<b># Torre</b>
1	132	107.513406	12.2779276	26	Torre 1
2	154	107.513406	14.3242489	39	Torre 1
3	118	107.513406	10.9757232	52	Torre 1
4	144	107.513406	13.3941029	65	Torre 2
5	140	107.513406	13.0220445	78	Torre 2
6	156	107.513406	14.5102781	91	Torre 2
7	144	107.513406	13.3941029	104	Torre 2
8	142	107.513406	13.2080737	117	Torre 3
9	175	107.513406	16.2775556	130	Torre 3
10	163	107.513406	15.1613803	143	Torre 3
11	187	107.513406	17.3937308	156	Torre 4
12	182	107.513406	16.9286578	169	Torre 4
13	144	107.513406	13.3941029	182	Torre 4
14	176	107.513406	16.3705702	195	Torre 5
15	150	107.513406	13.9521905	208	Torre 5
16	167	107.513406	15.5334387	221	Torre 5
17	154	107.513406	14.3242489	234	Torre 6
18	135	107.513406	12.5569714	247	Torre 6
19	142	107.513406	13.2080737	250	Torre 6
20	164	107.513406	15.2543949	263	Volado
21	192	107.513406	17.8588038	276	Volado

**Tabla 8.** Datos recabados para el gráfico de la pluviometría 15 kph.

<b>Lámina</b>				
<b>Número</b>	<b>Precp. en mm</b>	<b><math>\bar{y}</math></b>	<b><math>Y_i - \bar{y}</math></b>	<b>Distancia</b>
21	26.9965585	24.08	2.91655846	26
11	26.2935231	24.08	2.21352308	39
9	25.5904877	24.08	1.51048771	52
14	24.7468453	24.08	0.66684525	65
12	24.6062382	24.08	0.52623818	78
20	23.4813816	24.08	0.59861842	91
16	23.0595604	24.08	1.02043965	104
17	22.9189533	24.08	1.16104672	117
10	21.9347037	24.08	2.14529625	130
15	21.6534896	24.08	2.4265104	143
2	21.6534896	24.08	2.4265104	156
13	21.0910613	24.08	2.9889387	169
1	20.2474188	24.08	3.83258116	182
4	20.2474188	24.08	3.83258116	195
6	20.2474188	24.08	3.83258116	208
19	19.9662047	24.08	4.11379531	221
5	19.9662047	24.08	4.11379531	234
7	19.6849905	24.08	4.39500946	247
18	18.9819552	24.08	5.09804483	250
8	18.5601339	24.08	5.51986606	263
3	16.5916349	24.08	7.48836511	276
$\Sigma$				
<b>Sumatoria</b>	<b>458.519673</b>		<b>62.8276328</b>	
<b>Promedio</b>	21.8342701			

**Tabla 9.** Datos para el cálculo del CUC 15 kph.

<b>CUC %</b>	<b>89.915451</b>
--------------	------------------

<b>CUC lpp 5 kph</b>	<b>86.2977236</b>
----------------------	-------------------

# Bote	Distancia	Pw	
		Kohms aplicado por pivote	Pw req. Por planta.
21	-276	-8.9	-4.5
11	-263	-7.67	-4.5
9	-250	-7.45	-4.5
14	-247	-7.36	-4.5
12	-234	-7.12	-4.5
20	-221	-6.4	-4.5
16	-208	-6.37	-4.5
17	-195	-6.32	-4.5
10	-182	-6.25	-4.5
15	-169	-6.15	-4.5
2	-156	-5.87	-4.5
13	-143	-5.65	-4.5
1	-130	-5.28	-4.5
4	-117	-5.15	-4.5
6	-104	-4.85	-4.5
19	-91	-4.85	-4.5
5	-78	-4.76	-4.5
7	-65	-4.3	-4.5
18	-52	-4.15	-4.5
8	-39	-3.64	-4.5
3	-26	-3.62	-4.5

**Tabla 10.** Datos cálculo Pw con el método gravimétrico 15 kph.

**Datos de Prueba a 20 kph**

<b># Bote</b>	<b>Q recolectado cm3</b>	<b>A. de bote</b>	<b>Lámina PP en mm</b>	<b>Distancia</b>	<b># Torre</b>
1	112	107.513406	10.4176356	26	Torre 1
2	132	107.513406	12.2779276	39	Torre 1
3	100	107.513406	9.30146033	52	Torre 1
4	121	107.513406	11.254767	65	Torre 2
5	120	107.513406	11.1617524	78	Torre 2
6	132	107.513406	12.2779276	91	Torre 2
7	118	107.513406	10.9757232	104	Torre 2
8	120	107.513406	11.1617524	117	Torre 3
9	150	107.513406	13.9521905	130	Torre 3
10	146	107.513406	13.5801321	143	Torre 3
11	165	107.513406	15.3474095	156	Torre 4
12	160	107.513406	14.8823365	169	Torre 4
13	122	107.513406	11.3477816	182	Torre 4
14	154	107.513406	14.3242489	195	Torre 5
15	132	107.513406	12.2779276	208	Torre 5
16	143	107.513406	13.3010883	221	Torre 5
17	132	107.513406	12.2779276	234	Torre 6
18	120	107.513406	11.1617524	247	Torre 6
19	113	107.513406	10.5106502	250	Torre 6
20	142	107.513406	13.2080737	263	Volado
21	170	107.513406	15.8124826	276	Volado

**Tabla 11.** Datos recabados para el gráfico de la pluviometría 20 kph.

<b>Lámina</b>				
<b>Número</b>	<b>Precp. en mm</b>	<b><math>\bar{y}</math></b>	<b><math>Y_i - \bar{y}</math></b>	<b>Distancia</b>
21	23.9032028	24.08	0.1767972	26
11	23.2001674	24.08	0.87983257	39
9	22.497132	24.08	1.58286795	52
14	21.6534896	24.08	2.4265104	65
12	21.0910613	24.08	2.9889387	78
20	20.528633	24.08	3.551367	91
16	20.1068118	24.08	3.97318823	104
17	19.9662047	24.08	4.11379531	117
10	18.5601339	24.08	5.51986606	130
15	18.5601339	24.08	5.51986606	143
2	18.5601339	24.08	5.51986606	156
13	18.5601339	24.08	5.51986606	169
1	17.1540632	24.08	6.92593681	182
4	17.0134561	24.08	7.06654389	195
6	16.872849	24.08	7.20715096	208
19	16.872849	24.08	7.20715096	221
5	16.872849	24.08	7.20715096	234
7	16.5916349	24.08	7.48836511	247
18	15.8885995	24.08	8.19140049	250
8	15.7479924	24.08	8.33200757	263
3	14.0607075	24.08	10.0192925	276
$\Sigma$				
<b>Sumatoria</b>	<b>394.262239</b>		<b>111.417761</b>	
<b>Promedio</b>	<b>18.7743923</b>			

**Tabla 12.** Datos para el cálculo del CUC 20 kph.

<b>CUC %</b>	<b>88.4586645</b>
--------------	-------------------

<b>CUC lpp 5 kph</b>	<b>71.7401897</b>
----------------------	-------------------

### Datos de Prueba a 26 *kph*

# Bote	Gasto depositado en Cm3	A. de bote	Lámina PP en mm	Distancia	# Torre
1	90	107.513406	8.3713143	26	Torre 1
2	102	107.513406	9.48748954	39	Torre 1
3	95	107.513406	8.83638731	52	Torre 1
4	112	107.513406	10.4176356	65	Torre 2
5	108	107.513406	10.0455772	78	Torre 2
6	123	107.513406	11.4407962	91	Torre 2
7	104	107.513406	9.67351874	104	Torre 2
8	110	107.513406	10.2316064	117	Torre 3
9	142	107.513406	13.2080737	130	Torre 3
10	142	107.513406	13.2080737	143	Torre 3
11	154	107.513406	14.3242489	156	Torre 4
12	152	107.513406	14.1382197	169	Torre 4
13	110	107.513406	10.2316064	182	Torre 4
14	132	107.513406	12.2779276	195	Torre 5
15	112	107.513406	10.4176356	208	Torre 5
16	124	107.513406	11.5338108	221	Torre 5
17	120	107.513406	11.1617524	234	Torre 6
18	103	107.513406	9.58050414	247	Torre 6
19	103	107.513406	9.58050414	250	Torre 6
20	130	107.513406	12.0918984	263	Volado
21	154	107.513406	14.3242489	276	Volado

**Tabla 13.** Datos para el cálculo del gráfico de la pluviometría 26 *kph*

<b>Lámina</b>				
<b>Número</b>	<b>Precp. en mm</b>	<b><math>\bar{y}</math></b>	<b><math>Y_i - \bar{y}</math></b>	<b>Distancia</b>
21	21.6534896	24.08	2.4265104	26
11	21.6534896	24.08	2.4265104	39
9	21.3722754	24.08	2.70772455	52
14	19.9662047	24.08	4.11379531	65
12	19.9662047	24.08	4.11379531	78
20	18.5601339	24.08	5.51986606	91
16	18.2789198	24.08	5.80108021	104
17	17.4352773	24.08	6.64472266	117
10	17.2946703	24.08	6.78532974	130
15	16.872849	24.08	7.20715096	143
2	15.7479924	24.08	8.33200757	156
13	15.7479924	24.08	8.33200757	169
1	15.4667783	24.08	8.61322172	182
4	15.4667783	24.08	8.61322172	195
6	15.1855641	24.08	8.89443587	208
19	14.6231358	24.08	9.45686417	221
5	14.4825288	24.08	9.59747124	234
7	14.4825288	24.08	9.59747124	247
18	14.3419217	24.08	9.73807832	250
8	13.3576722	24.08	10.7223278	263
3	12.6546368	24.08	11.4253632	276
$\Sigma$				
<b>Sumatoria</b>	<b>354.611044</b>		<b>151.068956</b>	
<b>Promedio</b>	16.8862402			

**Tabla 14.** Datos para el cálculo del CUC 26 kph.

<b>CUC %</b>	<b>86.3487028</b>
--------------	-------------------

<b>CUC lpp 5 kph</b>	<b>57.3986883</b>
----------------------	-------------------

# Bote	Distancia	Pw	
		Kohms aplicado por pivote	Pw req. Por planta.
21	-276	-9.36	-4.5
11	-263	-9.12	-4.5
9	-250	-8.67	-4.5
14	-247	-8.12	-4.5
12	-234	-7.89	-4.5
20	-221	-7.89	-4.5
16	-208	-7.44	-4.5
17	-195	-7.28	-4.5
10	-182	-7.21	-4.5
15	-169	-6.7	-4.5
2	-156	-6.54	-4.5
13	-143	-6.54	-4.5
1	-130	-6.34	-4.5
4	-117	-6.23	-4.5
6	-104	-6.12	-4.5
19	-91	-5.46	-4.5
5	-78	-5.43	-4.5
7	-65	-5.25	-4.5
18	-52	-5.15	-4.5
8	-39	-4.82	-4.5
3	-26	-4.67	-4.5

**Tabla 15.** Datos cálculo Pw con el método gravimétrico 26 kph.