

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**SIMULACIÓN DEL GRADIENTE HIDRÁULICO EN LÍNEAS LATERALES DE
RIEGO POR GOTEO**

POR:

JOEL AVIDAM HERNÁNDEZ PÉREZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA

OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN.

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO

MAYO DE 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

**SIMULACIÓN DEL GRADIENTE HIDRÁULICO EN LÍNEAS
LATERALES DE RIEGO POR GOTEO**

Por:

JOEL AVIDAM HERNÁNDEZ PÉREZ

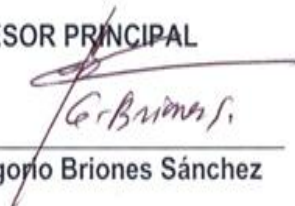
TESIS:

Que se Somete a Consideración del H. Jurado Examinador Como Requisito
Parcial Para Obtener El Título de:

Ingeniero Agrónomo en Irrigación


Aprobada por:

ASESOR PRINCIPAL




M.C. Gregorio Briones Sánchez

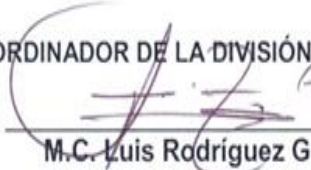
Coasesor


Dr. Felipe de Jesús Ortega Rivera

Coasesor


M.C. Tomás Reyna Cepeda
Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA


M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez
**Coordinación de
Ingeniería**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Mayo de 2012.

DEDICATORIA

A mis padres

Abenamar Hernández López y María Antonieta Pérez Vázquez

Por guiarme por el buen camino y ser ejemplo de trabajo y superación, gracias por darme su apoyo incondicional y el gran esfuerzo que han hecho para mi superación profesional Dios les bendiga por siempre.

A mis hermanos

Obed Isai Hernández Pérez y Merli Karina Hernández Pérez

Por estar siempre conmigo y brindarme su apoyo incondicional, a pesar de todo lo que hemos vivido como hermanos solo Dios nos ha sacado en adelante.

A mis abuelos

Alejandro Hernández López

Flavio Pérez Ramírez

Mercedes López Zamorano

Felisa Vázquez Hernández

Por demostrarme su cariño y apoyo durante toda mi vida, como también sus sabios consejos para enfrentar la vida.

A mis tíos (a)

A todos mis tíos (a) por estar siempre en sus oraciones y los consejos que me brindaron para ser un hombre de bien.

A mis amigos

Agradezco a mis amigos más cercanos Juan Antonio López López, Lucio Gonzalo Calvo Aguilar, José Avidail Calvo López con quienes viví y compartí muchas aventuras en la universidad, además por enfrentar juntos todos los obstáculos de la vida, por siempre les recordare.

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por darme sus grandes y ricas bendiciones y darme sabiduría para poder obtener este logro más de mi vida y sobre todo por existir en mi corazón.

***Porque Jehová da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia
Proverbios. 2:6***

A mi alma mater

Por abrirme sus puertas y ser parte de esta magnífica casa de estudios además por brindarme los conocimientos suficientes para enfrentar la vida. Estoy muy orgullo de ser Narro.

Al M.C. Gregorio Briones Sánchez, por participar en mi formación profesional y transmitir sus conocimientos, pero sobretodo sin él no habría sido posible la realización de esta tesis, gracias por el tiempo y la paciencia.

Al Dr. Felipe de Jesús Ortega Rivera, Por su valiosa aportación en la realización de ésta tesis y más que nada por enseñarme las maravillas de la hidráulica.

Al M.C. Tomás Reyna Cepeda, Por su valioso tiempo y sugerencias para la culminación de éste trabajo y gracias por brindarme su amistad.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE CUADROS	X
RESUMEN	XII
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Hipótesis	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Antecedentes sobre el estudio del gradiente hidráulico, en el riego localizado	4
2.2 Modelos de simulación numérica	9
2.3 Generalidades de los sistemas de riego por goteo	10
2.3.3 Descripción de los componentes	14
2.4 Emisores o goteros de riego	17
2.4.1 Clasificación de los emisores.....	17
2.4.2 Requisitos básicos para los emisores.....	18

2.5 Clasificación de goteros	19
2.6 Características y clasificación de cintas de riego	21
2.7 Procedimiento para el diseño del riego por goteo	24
2.8 Calculo de laterales.....	25
2.8.1 Criterio hidráulico	25
2.9 Longitud de las laterales de riego	29
2.10 Aspectos hidráulicos de goteros y cintas de riego	34
2.10.1 Relación caudal – presión.....	35
2.10.2 Uniformidad.....	37
2.11 Factores que afectan el Coeficiente de Emisión (UE)	37
2.11.1 Coeficiente de variación de fabricación (Constructivos)	38
2.13 Gradiente hidráulico	42
III. MATERIALES Y METODOS	44
3.1 Desarrollo del modelo	44
3.2 Aplicación del modelo	45
3.2.1 Descripción de las Ecuaciones utilizadas para el desarrollo del algoritmo matemático	49
3.3 Validación del modelo	51
IV. RESULTADOS Y DISCUSION	52
4.1 Cuadros de comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE% de catálogo para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con diferentes características técnicas de operación.	52

4.2 Cuadros de comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE% de catálogo para la cinta Aqua-Traxx pbx 16 mm con diferentes características técnicas de operación.	58
4.3 Cuadros de comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE% de catálogo para la cinta T-Tape Tsx 16 mm con diferentes características técnicas de operación.	59
4.4 Cuadros de comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE% de catálogo para la cinta Chapin-drip 16 mm con diferentes características técnicas de operación.	60
4.5 Graficas de longitudes máximas para las cintas Aqua-Traxx 16 mm, Aqua-Traxx pbx16 mm, T-Tape tsx 16 mm y Chapin-drip 16 mm a diferentes características técnicas de operación.	62
4.6 Gradiente hidráulico simulado con el modelo matemático con pendientes a nivel, en contra y a favor del flujo.....	67
V. CONCLUSIONES.....	71
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	72
VII. APÉNDICE	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Esquema general del sistema de riego por goteo.....	14
Figura 2. 2. Laterales de riego por goteo siguiendo las curvas de nivel.....	30
Figura 2. 3. Relación caudal–presión.....	36
Figura 2. 4. Distribución normal del caudal del emisor.....	40
Figura 2. 5. Simulación del gradiente hidráulico.....	42
Figura 4. 1. Longitudes máximas a diferentes espaciamientos entre goteros para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con uniformidades de 80%, 85% y 90%, para pendientes 0%, 1% y 2% en contra del flujo utilizando el gotero 0.49 lph.....	62
Figura 4. 2. Longitudes máximas a diferentes espaciamientos entre goteros para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con uniformidades de 80%, 85% y 90%, para pendientes 0%, 1% y 2% en contra del flujo utilizando el gotero 0.76 lph.	63
Figura 4. 3. Longitudes máximas a diferentes espaciamientos entre goteros para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con uniformidades de 80%, 85% y 90%, para pendientes 0%, 1% y 2% en contra del flujo utilizando el gotero 1.02 lph.	64
Figura 4. 4. Longitudes máximas a diferentes espaciamientos entre goteros para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con uniformidades de 80%, 85% y 90%, para pendientes 0%, 1% y 2% en contra del flujo utilizando el gotero 1.20 lph.	65
Figura 4. 5. Longitudes máximas para la cinta Aqua-Traxx pbx 16 mm con diferentes gastos a la entrada de la cinta con UE% = 90, pendiente 0%.....	65
Figura 4. 6. Longitudes máximas a diferentes gastos y espaciamientos entre goteros para la cinta T-Tape Psx 16 mm con uniformidades de 85% y 90%, pendiente 0%.	66
Figura 4. 7. Longitudes máximas para la cinta Chapin-drip 16 mm con diferentes gastos y espaciamientos entre goteros con UE% = 90, pendiente 0%.	66
Figura 4. 8. Gradiente hidráulico para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con el gotero 0.49 lph a 5.606 mca a 0% de pendiente con una UE% = 90.....	67
Figura 4. 9. Gradiente hidráulico para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con el gotero 0.49 lph a 5.606 mca a 1% de pendiente en contra con una UE% = 90.	68

Figura 4. 10. Gradiente hidráulico para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con el gotero 0.49 lph a 5.606 mca a 1% de pendiente a favor con una UE% = 90.	68
Figura 4. 11. Regresión lineal con el software minitab para validación del modelo y apreciación de la confiabilidad.	69

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro2. 1. Variación de la longitud de las laterales con la pendiente del terreno.	30
Cuadro2. 2. Variación de la longitud de las laterales en función de la autocompensación de los emisores.	31
Cuadro2. 3. Relación diámetro de la tubería y la longitud máxima del lateral.	32
Cuadro2. 4. Relación caudal del emisor y la longitud máxima del lateral.	32
Cuadro2. 5. Relación distancia del emisor y la longitud máxima del lateral.	33
Cuadro2. 6. Influencia de las características técnicas en la longitud de los laterales.	34
Cuadro2. 7. Clasificación de emisores según normas ISO y UNE.	38
Cuadro2. 8. Clasificación de emisión según norma ASAEP405.1 Para goteros, micro aspersores y difusores (según López, et, 1992 citado por Muños 2004). ...	39
Cuadro2. 9. Clasificación de emisores según norma ASAE EP405.1 Para tuberías emisoras. (Según López, et, 1992 citado por Muños 2004).	39
Cuadro2. 10. Valores de Coeficiente de Uniformidad de Caudales (CUC) (citado por Villavicencio y Villablanca).	40
Cuadro3. 1. Características técnicas de la cinta de goteo.	45
Cuadro3. 2. Coeficientes de variación del gasto (CVq) y los valores del exponente (x) de la ecuación carga-gasto para diferentes cintillas de goteo.	46
Cuadro3. 3. Diseño de la plantilla en Excel.	47
Cuadro 4. 1. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catalogo para diferentes pendientes del terreno para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con el gotero de 0.49 lph a espaciados de 20, 30, 40 y 60 cm entre goteros.	52
Cuadro 4. 2. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catalogo para diferentes pendientes del terreno para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con el gotero de 0.76 lph a espaciados de 20, 30 y 40 cm entre goteros.	54
Cuadro 4. 3. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catalogo para diferentes pendientes del terreno para la cinta Aqua-Traxx 16 mm	

con el gotero de 1.02 lph a espaciados de 10, 20, 30, 40 y 60 cm entre goteros..	55
.....	
Cuadro 4. 4. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catalogo para diferentes pendientes del terreno para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con el gotero de 1.20 lph a espaciados de 40 y 60 cm entre goteros.	57
Cuadro 4. 5. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catalogo para la cinta Aqua-Traxx pbx 16 mm a espaciados de 10, 20, 30 y 40 cm con diferentes gastos de los emisores.	58
Cuadro 4. 6. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catalogo para la cinta T-Tape Tsx 16 mm a diferentes espaciados y gastos de los emisores de la cinta de riego con una presión de operación de 5.61 mca.....	59
Cuadro 4. 7. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catalogo para la cinta chapin-drip 16 mm con diferentes gastos y a espaciados diferentes entre goteros.	60
Cuadro 4. 8. Análisis de varianza de la regresión lineal.....	69
Cuadro 4. 9. Inferencia estadística.....	70

SIMULACIÓN DEL GRADIENTE HIDRÁULICO EN LINEAS LATERALES DE RIEGO POR GOTEO

Por: Joel Avidam Hernández Pérez

RESUMEN

El riego por goteo es uno de los sistemas con una alta uniformidad de emisión en la aplicación del agua en comparación con otros sistemas de riego. Para tener una alta uniformidad en los sistemas de riego por goteo se necesita hacer un buen diseño del sistema tomando en cuenta las características técnicas de las cintas.

El presente trabajo se desarrollo en el centro de cómputo del departamento de “Riego y Drenaje”, de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” ubicado en Buenavista Saltillo, Coahuila. Este trabajo tiene como objetivo, simular el comportamiento del gradiente hidráulico en la cinta de goteo, así como también comparar la uniformidad de emisión calculada por el algoritmo contra la uniformidad de emisión del catálogo del fabricante.

El método del elemento finito empleado para realizar la simulación del gradiente hidráulico en las líneas regantes de goteo se aplico para resolver el algoritmo lógico matemático en una rutina que se arranca o se reinicia desde el último emisor hasta el primero. El algoritmo comprende los siguientes principios hidrodinámicos clásicos en el estudio del agua en movimiento: Ecuación del gasto del emisor, Método de la longitud equivalente, Teorema de Continuidad, Teorema de energía de Bernoulli, Conversión de unidades, Ecuación de uniformidad de emisión.

Los datos de entrada necesarios en las diferentes líneas regantes por goteo involucrados en la simulación del gradiente hidráulico por el método del elemento finito son los siguientes:

a) Diámetro interno de la manguera ID en mm, b) Separación entre los emisores Se en m, c) desnivel topográfico en cada tramo Az en m, siendo (+) si es

descendente y (-) si es ascendente, d) Número total de emisores Ne dispuestos en la longitud completa de la línea regante, e) Coeficiente K del emisor calibrado para obtener gasto “qi” en LPH ingresando la carga “Hi” en m, f) Exponente x de gasto para el emisor, g) Carga de presión Hn para el ultimo emisor en m, tal carga “Hn” es propuesta por el diseñador considerando el escenario y h) el coeficiente de variación de manufactura.

Los catálogos de las cintas que fueron analizadas para hacer las predicciones con el algoritmo en 164 simulaciones fueron: Aqua-traxx 16 mm, Aqua-traxx pbx 16 mm, T-tape tsx 16 mm y cinta Chapin-drip 16 mm a diferentes gastos, espaciamientos entre emisores y diferentes presiones, en cintas en líneas a nivel, con pendiente a favor y con pendiente en contra. Los resultados obtenidos en el análisis de la regresión lineal, son altamente significativo, ya que el coeficiente de correlación fue de 97.3%, esto significa que las predicciones calculadas son altamente confiables, y la lógica de la programación y los cálculos son correctos y cotejan con el algoritmo matemático. Se encontró una diferencia promedio menor del 1% en la comparación de la UE% calculada contra la UE% catálogo tal error no es significativo en las simulaciones del gradiente hidráulico. Se verificó que las predicciones del modelo son consistentes con los datos de entrada procesados observando que la UE% calculada está relacionada principalmente con la variación de manufactura, exponente x del emisor, gasto del gotero, separación entre goteros y la pendiente. El modelo se puede utilizar para construir el gradiente hidráulico en laterales de riego por goteo telescopeadas y también en laterales tendidas sobre terreno con pendiente topográfica variable.

Palabras clave: gradiente hidráulico, método del elemento finito, algoritmo lógico-matemático, coeficiente de uniformidad, cintas de goteo.

I. INTRODUCCIÓN

La longitud de una lateral tiene un efecto directo sobre la uniformidad de emisión (UE) de cada línea regante, si las líneas laterales son muy largas el gradiente hidráulico sufre una mayor caída causadas por las pérdidas por fricción ocasionando que los emisores al inicio de la longitud descarguen más agua que al final de la distancia recorrida por el flujo. En general se puede instalar líneas regantes más largas con buena uniformidad al seleccionar emisores de bajo flujo, con exponente de descarga $X= 0.1$ y diámetros de manguera lateral mayores al convencional, aunque todas las cintas y mangueras tienen sus límites.

La uniformidad de emisión (UE) de una línea regante está determinada por su longitud, pendiente, presión de operación, caudal de entrada, exponente X , espaciado de los emisores y coeficiente de una variación de manufactura además de la temperatura del agua.

El diseño de un sistema de goteo se basa en el comportamiento hidráulico de una sola línea regante y en el análisis de una línea distribuidora completa que alimenta muchas líneas regantes.

Debido a que cada línea lateral contiene cientos de emisores y se instalan muchas laterales dentro de una sección de riego entonces resulta tedioso e impráctico el cálculo pasó por paso sin la ayuda de una computadora.

Los estudios en riego por goteo se enfocan principalmente en una sola línea lateral que se asume representativa de todas las demás alimentadas desde una misma tubería distribuidora.

Los procedimientos de diseño ayudados por la computadora están facilitando la aplicación de las rutinas del cálculo paso por paso para construir el gradiente hidráulico de las líneas de goteo desde los últimos emisores hacia el primero siguiendo la metodología del paso hacia atrás.

El cálculo paso a paso es aplicado emisor por emisor y en cada paso del análisis se recorre un espacio considerando tal espacio como un elemento finito caracterizado físicamente por las variables de manufactura para la manguera y para el emisor.

Para una línea regante en operación, la carga (H) y el caudal (q) de cada emisor se pueden predecir confiadamente mediante un balance de energía y un balance de masa, respectivamente.

Si la línea de riego por goteo (lateral o secundaria) se coloca sobre un terreno llano, la variación en presión a la largo de la línea estará indicada por la línea del gradiente de energía. Si la línea de riego por goteo se coloca arriba o hacia debajo de pendientes, la variación en presión será afectada por las pendientes. La variación en presión (el cambio en presión con respecto al largo) se puede determinar como una combinación lineal de la energía de la pendiente y la pendiente de la línea, asumiendo que el cambio de la cabecera de velocidad es pequeño o insignificante.

1.1 Objetivos

- Predecir la carga (H_i) para cada emisor aplicando el teorema de Bernoulli
- Predecir el caudal (q_i) por cada emisor asociada a la carga hidráulica ejercida.
- Aplicar el método del elemento finito para simular el gradiente hidráulico de una línea regante por goteo.
- Construir el algoritmo lógico-matemático para resolver la rutina del cálculo hidráulico pasó por paso para incorporar congruentemente la ecuación del emisor, los datos de la manguera o cinta de goteo, la ecuación de Hazen-Williams, el teorema de balance de energía, el principio de continuidad y los criterios de diseño aplicables por normas en riego localizado.

1.2 Hipótesis

El algoritmo lógico-matemático que se realizara mediante en el paquete de Excel Será eficiente para ayudar a simular el comportamiento hidráulico de los sistemas de riego por goteo. Y de esta manera ser una herramienta para los diseñadores de los mismos.

H₀: UE% calculada = UE% catálogo.

H_a: UE% calculada \neq UE% catálogo.

Prueba de hipótesis y ensayo de significancia:

Si $t_c \leq t_{\alpha}$ se acepta **H₀**

Si $t_c \geq t_{\alpha}$ se rechaza **H₀**

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes sobre el estudio del gradiente hidráulico, en el riego localizado

Philipova (2008) desarrollo un modelo para el diseño hidráulico de una lateral de riego por goteo aplicando la teoría del flujo especialmente variado. Hizo el esquema de la unidad utilizando el programa simulink- Matlab para resolver las ecuaciones diferenciales; y como resultado fueron obtenidos los diagramas de distribución del gasto para la línea lateral, la carga de presión, la carga permisible, la descarga emitida para cada gotero a lo largo de la longitud de manguera y otras características.

El modelo desarrollado para el diseño hidráulico de lateral de goteo es comparado con datos experimentales para la manguera israelí de Netafim “Typhoon 16250” con descarga del gotero $q = 1.75$ lph y espaciado entre emisores $S_e = 0.30$ m; una presión nominal de 10 m, un numero de emisores de 233 y longitud de $L_e = 70$ m, el diámetro interno es $\varnothing = 15.4$ mm. La relación de gasto contra carga para el gotero era $q = 0.579H^{0.48}$ tomada del catálogo de Netafim.

Según Cortes (1992) cita que Feng y wu (1990) representaron el diseño de sistemas de riego por goteo para todos los flujos de salida de los emisores donde la uniformidad es usada para determinar la eficiencia de aplicación. En ese estudio se demuestra que la uniformidad de un sistema de riego por goteo es afectada principalmente por el diseño hidráulico, la variación de manufactura, los efectos de temperatura y taponamiento; entre otros factores. El diseño hidráulico puede ser controlado por los ingenieros que diseñan el sistema bajo ciertos criterios especificados; que incorporan el teorema de energía, ecuación de continuidad, ecuación del emisor, formula de fricción y especificaciones técnicas.

Cortés (1992) menciona que Pitts Ferguson y Wright (1986) desarrollaron un modelo de computadora para realizar el diseño de la línea lateral de los sistemas de riego por goteo basado en la estimación de la uniformidad de los emisores.

La uniformidad en la descarga de los emisores fue definida por un coeficiente de variación global el cual se obtuvo por combinación de la variación estadística debido a manufactura y variación debido a la hidráulica. Los coeficientes de variación por manufactura y las relaciones presión-descarga para 14 emisores comerciales fueron determinados para validar y utilizar el modelo.

Kang et al. (1996) citado por Mahrous et al. (2008) desarrollaron un método para el diseño de riego por goteo incluida la subprincipal basados en el promedio de descarga del emisor y la buena uniformidad requerida en la distribución del agua dentro de las unidades mediante la aplicación del método del elemento finito.

Sharaf (2004) citado por Mahrous et al. (2008) desarrolló un procedimiento simple de diseño para el análisis hidráulico y evaluación de la uniformidad para subunidades de forma irregular en sistemas de riego de goteo; el modelo de simulación por computadora se llama Back Step Method (metodología del paso hacia atrás). El cual verifica y evalúa el procedimiento de diseño. Este estudio reveló que la longitud de lateral y las pendientes tienen mayor efecto sobre la uniformidad de la subunidad que la longitud de la distribuidora y su pendiente. La descarga del emisor es considerada como una variable espacial que compensa la variación asumida para el emisor en el método presentado.

Muños (2004) desarrolló la evaluación hidráulica de tres marcas de goteros y dos modelos de cinta utilizados en sistemas de riego localizado, realizada en el laboratorio del Centro de Investigación y de Transferencia Tecnológica en Riego y Agroclimatología (CITRA) perteneciente a la Facultad de Ciencia Agrarias de la Universidad de Talca. Para dicha evaluación se aplicó la norma internacional ISO 9260 sobre procedimientos para obtener el coeficiente de variación de fabricación,

la relación caudal-presión y el efecto que ejerce la temperatura sobre la descarga del emisor.

Los resultados señalan para el coeficiente de variación de fabricación (CVF) que los goteros marca NGE y O-Tiff pertenecen a la categoría A (CVF: 4,5% y 2,37% respectivamente) y el gotero marca Microflapper es catalogado como B (CVF: 6,28%).

Las cintas de riego Aqua Traxx cumplen con la Categoría A para sus modelos compensado y no compensado, con CVF 4,46% y 1,02% respectivamente.

En la curva caudal – presión de cada emisor, se calcularon las siguientes ecuaciones que reflejan su comportamiento: para el emisor Microflapper, $q = 2.3209h^{0.1133}$, O-Tiff, $q = 0.6844h^{0.3872}$, la ecuación para el gotero NGE que obtuvo un mayor ajuste no fue del tipo exponencial como en los otros casos, si no del tipo lineal y fue de $q = 4.0532h^{0.0072}$.

En el caso de la cinta Aqua Traxx, modelo compensado, la ecuación de la curva caudal presión fue de $q = 0.3474h^{0.2342}$ y para el modelo no compensado, $q = 0.2232h^{0.3691}$. Además en lo que a desviación del caudal respecto al caudal nominal se refiere, las marcas de goteros Microflapper y O-Tiff son consideradas como categoría A por la norma internacional ISO 9260 al igual que la cinta de riego Aqua Traxx modelo no compensado. Por su parte, el gotero NGE es considerado categoría B y la cinta Aqua Traxx modelo compensado no obtiene ninguna categoría.

Gil, Khan y Hernández (2002) evaluaron el comportamiento hidráulico de varios emisores importados para riego por goteo. Este experimento se llevo a cabo en el Laboratorio de Riego y Drenaje del Departamento de Ingeniería Agrícola de la universidad de Oriente, donde se tomaron como objetivos principales los siguientes: i) determinar las características hidráulicas de los goteros, estimando los parámetros que mejor expliquen su funcionamiento: relación caudal vs. Presión

y determinar el coeficiente de variación por fabricación de los diferentes modelos de emisores. Los goteros evaluados fueron: Gotero Ultra 2-40; Gotero LB2; Gotero LBC2 y Gotero Tipaz. Entre los resultados obtenidos se observó una correlación alta para las relaciones caudal vs. Presión.

En cuanto al coeficiente por fabricación, los emisores LB2 y Ultra 2-40, resultaron los mejores con valores de 0,04 y 0,027 respectivamente, lo que se califica como excelentes.

A. Losada et al. (1995) realizaron una metodología de trabajo para el cálculo y manejo de instalaciones de riego por goteo. Se exponen resultados experimentales que evidencian la variabilidad que es posible esperar en los parámetros que describen el gasto de los goteros. Se justifica el empleo de la fórmula de BLASIUS para el estudio de ramales de goteo, con la restricción de que deberá tenerse en cuenta la longitud equivalente de pérdidas de carga localizadas en los puntos de inserción de goteros (a determinar también experimentalmente). Finalmente, se propone determinar la distribución del gasto en una unidad de riego, a partir de la de presiones. El correspondiente modelo de simulación se basa en cálculos iterativos y hace intervenir el coeficiente de variación de fabricación de los goteros. El modelo así desarrollado es aplicado al estudio de la sensibilidad de los resultados con que un sistema de riego dado responde a cambios que los parámetros del gotero pueden experimentar durante su vida útil.

Cea (s.f) realizó un estudio sobre el comportamiento hidráulico de seis modelos de cintas de riego no compensadas, comercializadas en Chile, se realizó en el laboratorio del Centro de Investigación y Transferencia Tecnológica en Riego y Agroclimatología (CITRA), de la Universidad de Talca.

La evaluación señalada aplicó la norma Mexicana NMX-E-225-1998-SCFI a muestras de cintas de riego Aquatraxx 6 Mil, T-TapeTSX 4 Mil, Ura-T Pathfinder 6

Mil y Chapin 5, 6 y 8 Mil, determinando para cada una de ellas el Coeficiente de Variación de Fabricación (CVF), los Coeficientes de Descarga (Kd) y Exponente de Descarga (X) de la relación potencial Caudal - Presión y parámetros n y m de la relación lineal Caudal -Temperatura del agua.

Para las condiciones bajo las cuales se desarrolló el estudio, los valores de CVF obtenidos fueron 2,04% para la cinta Aquatraxx 6 Mil; 4,16% para la Ura-T Pathfinder 6 Mil; 0,93% para Chapin 5 Mil; 2,18% para Chapin 6 Mil y 1,26% para la cinta Chapin 8 Mil. De acuerdo a la norma ISO 9260 y mexicana, se clasifican según CVF en la denominada categoría A, donde el coeficiente de variación de fabricación es inferior a un 5%.

La cinta T-TapeTSX presentó un valor de CVF de 5,27%, considerándose según las normas señaladas en la categoría B, al presentar su valor entre un 5 y 10%. Por otra parte, según la norma ASAE EP405.1, todas las cintas evaluadas califican como buenas al presentar valores para CVF, inferiores al 10%.

Veliz et al. (2007) realizaron una metodología para la evaluación de los emisores, basados en criterios normalizados internacionales existentes en literatura, se ofrece, además, los resultados de su aplicación en la evaluación de tres goteros comerciales.

2.2 Modelos de simulación numérica

Son modelos en los que se emplea, principalmente, ecuaciones diferenciales y condiciones iniciales de borde, que son resueltos utilizando técnicas de análisis numérico, tales como métodos de diferencias finitas y elementos finitos.

Los métodos de diferencias finitas son capaces de simular algunos procesos que son imposibles de resolver con el simple cálculo. Ambos métodos resuelven las ecuaciones que tienen dominio continuo mediante la solución en un número finito de puntos discretos en dicho dominio, llamados nodos.

Cuando los valores buscados (tirante, velocidad, etc.) en dichos puntos discretos son encontrados, la solución en cualquier otro punto puede ser aproximada mediante métodos de interpolación. Estos modelos numéricos proporcionan mucho más detalle y precisión que los métodos analíticos convencionales, siendo capaces de manejar condiciones de borde e iniciales complejas, para los cuales no existen en la mayoría de los casos soluciones analíticas.

El método de elementos finitos discretiza el área de estudio mediante una malla conformada por pequeños elementos que tienen formas triangulares o cuadrangulares. Los vértices de estos elementos representan los nodos de la malla en los cuales se busca encontrar el valor de la variable incógnita, ya sea el nivel de agua o velocidad.

Estos elementos locales son ensamblados mediante los procedimientos de álgebra lineal en matrices globales, en los cuales el vector solución representa las soluciones nodales. Este método es esencialmente útil y versátil para acomodar geometrías complejas, permitiendo acomodar el tamaño y forma de los elementos a las necesidades de modelación.

2.3 Generalidades de los sistemas de riego por goteo

La historia del sistema de riego por goteo no es nueva ya que en la antigüedad la primer forma de riego gota a gota se realizaba enterrando vasijas de arcillas llenas de aguas con el fin de que el agua se fuera infiltrando poco a poco en el suelo.

El sistema de riego por goteo que conocemos hoy en día se genero en Alemania en el año 1860, cuando se comenzó a experimentar con la subirrigación a través de tuberías de arcilla y así desarrollar un sistema de combinación de irrigación y drenaje. Para los años 1920 se utilizaron tuberías perforadas. Una vez que al mundo llego el plástico luego de la segunda guerra mundial, se realizaron mejoras circunstanciales en micro-tubos de plástico y con diversos tipos de goteos los cuales fueron implementados en los invernaderos de Europa y también en los Estados Unidos.

La forma de riego por goteo como la conocemos ahora fue inventada por Simcha Blass de Israel y por su hijo Yeshayahu. La forma renovadora que tuvieron fue la de liberar agua por agujeros muy pequeños, el agua es liberada por la tubería grandes y largas realizando así el frotamiento para ralentizar la velocidad del agua en el interior de gotero de plástico.

Los experimentos del riego por goteo fueron establecidos en 1959 por la familia de Blass en el Kibboutz Hatzerim que fue quien creó una compañía de riego llamada Netafim. Luego se desarrollaron y se patentaron el primer sistema de riego por goteo exterior, este tipo de inventos fueron mayormente desarrollados en Australia, en América del Norte y en América del Sur hacia el fin de los años 60.

2.3.1 Las características del riego por goteo

- La utilización de pequeños caudales de agua a muy baja presión.
- La ubicación del agua en la proximidad de las plantas es a través de un número de variables de puntos de emisión.
- Como la cantidad de suelo mojado es menor, la capacidad que tiene de almacenamiento, se debe operar con una alta frecuencia de aplicación, a dosis pequeñas.

Muños (2004) describe el riego por goteo como un sistema que proporciona agua filtrada y fertilizantes directamente sobre el suelo al lado de la planta. Este sistema elimina la aspersion y el agua que fluye sobre la superficie del suelo; permite que el agua, liberada a baja presión en el punto de emisión, moje el perfil del suelo en una forma predeterminada.

El riego localizado, ha sido una gran alternativa para mejorar las eficiencias de aplicación del agua a los cultivos, sobre todo en aquellos lugares en donde se presentan importantes restricciones como por ejemplo pendientes, erosionabilidad o escasez del recurso. Además, entre otras ventajas, tiene la capacidad de manejar caudales adecuados según el tipo de cultivo (tiempo y frecuencia según las demandas), mínima pérdida de agua por escurrimiento superficial y percolación profunda.

Según Gurovich (1985) el agua de riego es transportada a través de una línea de tubería plásticas hasta cada planta, el accesorio que emite el agua en el suelo se le denomina emisor o gotero. Los emisores disipan la presión que existe en la red de tuberías por medio de un orificio de pequeño diámetro, o por medio de un largo camino de recorrido; de esta forma disminuye la presión el agua y permite descargar desde el sistema hacia el suelo solamente unos pocos litros por hora

por cada gotero. Después de dejar el emisor, el agua es distribuida gracias a su movimiento normal a través de todo el perfil del suelo.

Santos et al. (2010) describe que la aplicación del agua en riego localizado, a semejanza del riego por aspersión, exige una red de tuberías principales, secundarias, terciarias y ramales normalmente, enterradas, a excepción de los ramales.

Los dispositivos, a partir de los cuales se aplica el agua al suelo, y en la zona radicular, se denominan emisores, los cuales se colocan equidistantes en el lateral, o por grupos en el caso de algunos cultivos leñosos.

No obstante, en riego localizado, en su variante por goteo, los espaciamientos, los caudales y las presiones de funcionamiento son muy inferiores, lo que con lleva a que, en general, la duración de la aplicación del agua y los intervalos entre riego son menores que en riego por aspersión.

El cálculo hidráulico de sistemas de riego por goteo deberá estudiar la capacidad de los mismos para imponer la presión adecuada en los goteros y distribuir el gasto requerido. Al proyectarlos, se estimarán las variables y parámetros resultantes de su manejo, previéndose reajustes operacionales tras las pruebas de evaluación que deben preceder a su adopción definitiva.

Menciona Santos et al. (2010) que la mayoría de los emisores de los riegos localizados, sobre todo los de goteo, funcionan a presiones muy bajas, normalmente inferiores a 10 m.

En terrenos ondulados, en el caso de que no se disponga de reguladores de presión adecuados, los caudales descargados varían fácilmente de un valor a más del doble, además de que las tuberías drenan a través de los emisores situados a menor cota después que el agua haya sido cortada, lo que aumenta la heterogeneidad de los caudales aplicados. En terrenos ondulados, o en pendiente, es necesario un adecuado diseño hidráulico de las instalaciones y la utilización de reguladores de caudal y presión.

2.3.2 Componentes básicos en riego localizado

Franco y Pérez (2007) describen que el agua de riego debe de entrar en el sistema dotada de la presión necesaria para hacer funcionar correctamente a la instalación. El camino que sigue después hasta que se pone a disposición del cultivo es el siguiente: entra al cabezal de riego que está compuesto por una serie de elementos que la filtra y tratan, es decir ajustan su calidad a los requerimientos tanto del sistema de riego como del cultivo; entonces pasa a la red de distribución donde es repartida a través de tuberías y elementos accesorios a las diferentes unidades y subunidades a regar; finalmente sale por los emisores de riego, que la aportan al suelo de donde podrá ser extraída por las plantas.

Los principales componentes de un sistema de riego por goteo son:

Cabezal de riego

- 1.-Bomba
- 2.-Válvula de equilibrio de la presión
- 3.-Válvula de vacío y de escape del aire
- 4.-Válvula de regulación de la presión
- 5.-Tanque de fertilizante
- 6.-Válvula comando de la tubería principal
- 7.-Manómetro
- 8.-Filtro
- 9.-Caudalímetro

Red de tuberías

- 10.-Tubería principal
- 11.-Válvulas de sector
- 12.-Tubería portar ramales con goteros
- 13.-Tuberías porta goteros
- 14.-Conexión entre las tuberías portar ramales y ramales con goteros.

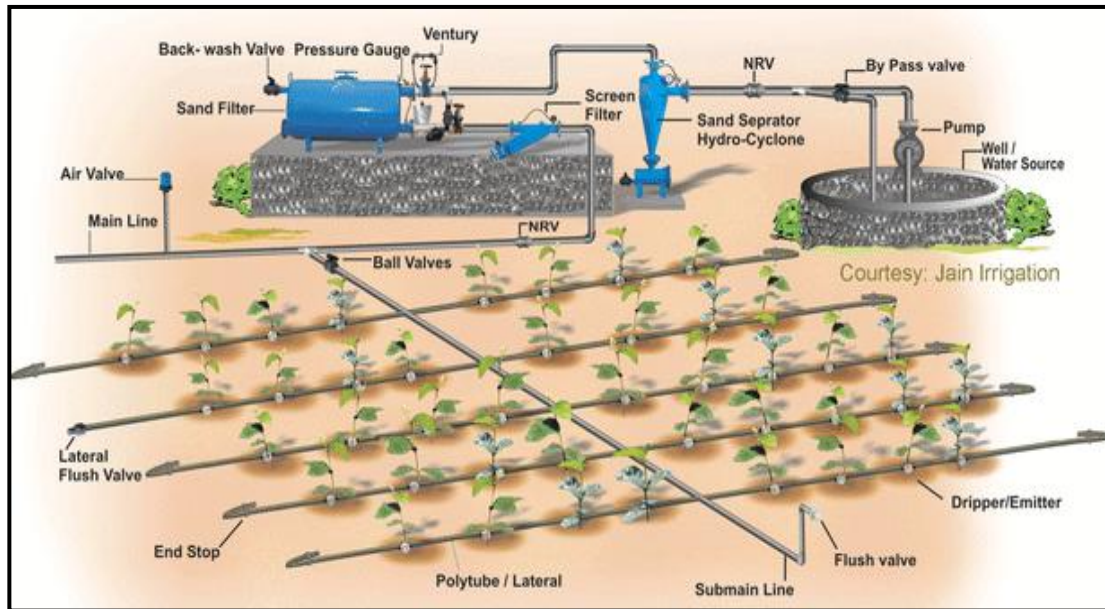


Figura 2. 1. Esquema general del sistema de riego por goteo.

2.3.3 Descripción de los componentes

Bomba: El agua necesita energía para a través del sistema de filtración, las diferentes válvulas y dispositivos mecánicos para el control del flujo, avanzar por la red de tuberías y finalmente llegar al punto de aplicación pero para que se pueda llevar a cabo esta acción se necesita un motor-bomba como fuente de presión. El motor que hace funcionar la bomba puede ser eléctrico o de combustión interna.

Válvula de alivio de la presión: Los reguladores de presión funcionan por la deformación de una membrana que, con una mayor presión, restringe la sección de paso del agua, provocando ahí una pérdida de carga localizada, tanto mayor cuanto más la presión se sitúe por encima de la deseada, dando caudales aproximadamente constantes en la red así regulada. Los reguladores de caudal funcionan por la actuación en la sección de paso del agua. Estos elementos se elegirán teniendo en cuenta la gama de caudales que se estima puedan circular en la sección donde se montan y para la gama de variación de presión que se puede prever, Santos et al. (2010).

Válvula de vacío y de escape del aire: Permite que el aire escape de la tubería de conducción, haciendo más eficiente el flujo de agua y evitando así las pérdidas de presión del sistema. Las válvulas de aire siempre se colocan antes del sistema de filtrado.

Válvula de regulación de la presión: Estas válvulas tienen como función controlar la presión de trabajo y su gasto.

Sistemas de inyección y dosificadores: Son equipos mediante los cuales se introduce al sistema los fertilizantes, agroquímicos y soluciones ácidas para prevenir taponamiento en los goteros y en las tuberías; estos pueden ser bombas de inyección, inyectoros por succión e inyectoros por dilución que trabajan con energía eléctrica o hidráulica.

Válvula comando de la tubería principal: Estos son equipos de seguridad y control del agua que se utiliza para cerrar o abrir conductos, puede regularse el gasto cerrándola o abriéndola la válvula.

Manómetro: Es uno de los equipos más importantes, ya que permite indicar la presión a la que es conducida el agua para riego, a su vez indica la presión a la que se encuentra trabajando el sistema.

Tanque de fertilizante: Los tanques de fertilizantes sirven para la inyección de fertilizante líquido en el agua de riego (fertirrigación); eventualmente, para la inyección de herbicidas o de productos fitosanitarios convenientemente disueltos (quimirrigación) y para la inyección de productos químicos que frenen la obstrucción de los emisores. Si se pretenden obtener mayores producciones con riego localizado, es esencial una aplicación correcta de fertilizantes y, en una agricultura con una avanzada tecnología, ejecutar los tratamientos con agroquímicos en combinación con los de riego, Santos et al. (2010).

Filtro: Los filtros son necesarios para reducir el riesgo de obstrucción de los goteros debido a las partículas sólidas y/o materia orgánica suspendida en el agua. Hay una gran variedad de filtros. El tipo, dimensión y número de filtros depende de la calidad del agua y del caudal, Santos et al. (2010).

Medidor de gasto: Los medidores, son dispositivos que relacionan la velocidad del agua en la tubería y el área de paso, con el gasto, cuentan con un indicador numérico que indica la cantidad de agua que pasa por la tubería para ser utilizada en el sistema, estos pueden ser de propela, rotámetro, de placa de orificio y tipo venturi.

Tubería de conducción: Este tipo de tuberías son partes esencial del riego por goteo e incluye todas aquellas tubería que conducen el agua de la fuente de abastecimiento a las unidades de riego, las tuberías de conducción pueden ser fabricadas con polietileno, PVC.

Líneas de distribución: Las líneas de distribución, son aquellas tuberías que tienen como función abastecer a las líneas regantes, a la vez son conectadas a uno o más lados de la línea de distribución, así mismo van conectados a la tubería de conducción o principal.

Líneas regantes: Estas líneas tienen la función de conducir el agua que será aplicada directamente al cultivo, en ellas van colocadas los emisores o goteros que se encuentran a espaciamientos predeterminados en la línea o sobre ella dependiendo de la configuración del emisor y el diseño.

Emisores o goteros: Los emisores, son uno de los elementos fundamentales de las instalaciones de riego localizado, y están encargados de controlar la salida de agua, desde las tuberías laterales, en puntos discretos o continuos con caudales inferiores a $12 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$.

2.4 Emisores o goteros de riego

Los emisores son los dispositivos encargados de la aplicación del agua al cultivo, estos dispositivos actúan como disparadores de energía de presión y permiten al agua salir de las tuberías para humedecer el terreno a través de pequeños poros u orificios, Rojas y Briones (2001).

2.4.1 Clasificación de los emisores

Santos et al. (2010) comenta que los emisores pueden ser clasificados según numerosos criterios: el régimen de descarga, la disipación de la presión, la conexión a la tubería, la distribución del agua, la forma de la sección transversal, la capacidad de obstruirse, la capacidad de compensar las 237 variaciones de presión, el material de construcción, etc.

En un sistema de riego localizado, se encuentran los siguientes tipos de emisores:

Goteros: Son emisores con caudales inferiores a 20 l/h. En ellos se produce una disipación de energía que para caudales inferiores a 8 l/h. Es casi total, por lo que el agua sale “gota a gota” y para caudales mayores conserva parte de la energía saliendo el agua en forma de pequeños “chorritos”.

Sistemas integrados: Se trata de conducciones en las que, en el propio proceso de fabricación, se insertan interiormente goteros uniformemente espaciados, generalmente con caudales inferiores a 4 l/h.

Manguera o cinta de goteo: Son conducciones que a su vez aplican agua de riego mediante perforaciones poco espaciadas (generalmente menos de 0,50 u), pared porosa, etc.

El caudal que descargan es menor a 20 l/h por metro lineal de conducción. Cuando se utilizan goteros o mangueras de goteo el principal medio de propagación del agua es el suelo.

Difusor: Son emisores por cuyo orificio de salida se lanza el agua al exterior con la suficiente presión para permitir su difusión a través del aire, tras incidir el chorro en un deflector fijo.

Microaspersores: Son aspersores de baja presión y caudal. El alcance es pequeño, normalmente inferior a 5 metros. Tanto los difusores como los aspersores tienen caudal inferior a los 200 l/h, en este caso el aire es el principal medio de propagación del agua.

2.4.2 Requisitos básicos para los emisores

Las características fundamentales que deberán tenerse presentes al seleccionar un emisor son:

- Caudal uniforme y constante, poco sensibles a la variación de presión
- Poca sensibilidad a las obturaciones
- Elevada uniformidad de fabricación
- Resistencia a la agresividad química y ambiental
- Bajo costo
- Reducida pérdida de carga en la conexión

2.5 Clasificación de goteros

En el mercado existe una amplia gama de goteros que se fabrican, los cuales se han clasificado para servir de orientación acorde con la situación que se presente. Según López, *et al* (1992) citado por Muños (2004) se pueden agrupar en cuatro apartados en función de su diseño y acabado.

El régimen hidráulico de los goteros repercute decisivamente sobre su funcionamiento. El régimen laminar se caracteriza en que las partículas de agua se mueven ordenadamente y a poca velocidad, disipándose la energía por fricción contra las paredes del conducto. Los goteros cuyo régimen se aproxima al laminar son sencillos y baratos, pero son sensibles a las obstrucciones, su caudal varía mucho con los cambios de presión (exponente de descarga próximo a la unidad) y, además, están influidos por la temperatura del agua. Debido a estos inconvenientes, estos goteros están prácticamente en desuso.

En el régimen turbulento las partículas de agua se mueven desordenadamente y con rapidez, disipándose la energía por choque entre las partículas y por fricción contra las paredes del conducto.

Los goteros de régimen turbulento más o menos perfecto son más resistentes a las obstrucciones, su caudal tiene una sensibilidad moderada con respecto a los cambios de presión (exponente de descarga alrededor de 0,5) y no son prácticamente afectados por la temperatura del agua.

Atendiendo a la configuración de su conducto, los goteros se pueden clasificar de la siguiente forma:

a. Goteros sellados, con dos o más piezas acopladas en fábrica que no pueden separarse si no es provocando su rotura. Cuando se obturan deben reemplazarse.

b. Goteros desmontables, de dos o más piezas que pueden separarse para proceder a su limpieza manual.

c. Goteros interlínea, de una sola pieza que se insertan dentro de la tubería utilizando parte de ésta como pieza exterior.

d. Goteros integrados, se sitúan en el interior de las tuberías, en el proceso de fabricación, sin que exista ningún tipo de acoples o juntas.

Según la configuración de los conductos de paso de agua, puede encontrarse:

Microtubos: Tubo de PE de diámetro entre 0,6-2mm y de longitud variable. Emisores de régimen laminar con alta sensibilidad a temperatura y presión y mayor riesgo a las obturaciones.

Su coste es menor y se pueden uniformizar los caudales cortando los microtubos a la longitud que la práctica demuestre como adecuada.

Goteros helicoidales: Modificaciones de los microtubos, enrollados alrededor de un cilindro y haciendo que la trayectoria del agua sea helicoidal y el régimen hidráulico se aleja de la condición laminar.

Goteros de laberinto: El agua circula de forma más tortuosa, en régimen turbulento, menos sensibles a temperatura, presión y obturaciones. Pueden ser interlínea y sobre línea.

Goteros de orificio: Goteros sobrelínea en los que el agua sale al exterior a través de un orificio de pequeño diámetro donde se disipa la presión disponible. El principal problema son las obturaciones, pues el orificio de salida es muy pequeño.

Gotero tipo vortex: Estos goteros tienen una cámara circular en donde se produce un flujo vorticial. Este movimiento se consigue al entrar el agua tangencialmente a la pared circular de la cámara, produciéndose una importante pérdida de carga.

Gotero autocompensante: Son de flujos turbulento o transitorio en los que se intenta obtener un caudal constante independiente de la presión. La autorregulación se consigue normalmente mediante una pieza móvil y flexible de caucho que se deforma bajo el efecto de la presión, disminuyendo la sección de paso del agua y limitando así el caudal. La autocompensación sólo se da entre un rango de presiones que es necesario conocer.

Autolimpiantes. Existen fundamentalmente dos tipos de goteros autolimpiantes los que pueden estar o no en posición limpiante y los que continuamente lo están. Los primeros sólo se limpian durante el corto tiempo que tarda el sistema en ponerse en funcionamiento y alcanzar la presión de régimen, o en pararse y pasar de esta a la presión atmosférica. Los segundos, de limpieza continua, están fabricados para que partículas relativamente grandes sean expulsadas durante su funcionamiento.

2.6 Características y clasificación de cintas de riego

Los materiales con los que se fabrica el riego con cintilla son los materiales de más alta calidad, plásticos especialmente seleccionados y estudiados para este fin en particular, el plástico que se utiliza se le hacen una serie de procedimientos, lo que nos da como resultado que sea altamente resistente a la penetración de los rayos UV, y a su vez que sea un material resistente a los productos químico y a todo tipo de fertilizantes.

La eficacia del riego con cintilla es muy buena, ya que se trata de un método de riego que se caracteriza por poseer una increíble uniformidad de distribución, esto

quiere decir que todo nuestro cultivo será proporcionado y retribuido con la misma ración de agua, dándonos como resultado una igualdad de calidad final del producto.

A su vez, otra de las grandes cualidades del sistema de riego con cintilla es que gracia a su método de funcionamiento se logra como resultado un gran ahorro de energía y de agua.

La cintilla comúnmente utilizada es de un calibre 4 (menor costo pero menos resistente), 6 (intermedio en costo y resistencia) y 8 (mayor costo pero más resistente) con grosor de pared en milésimas de pulgada y de ½ pulgada de diámetro. Se maneja con una presión de 10 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) con longitudes de hasta 120 m en terrenos con buena nivelación. En terrenos con pendiente pronunciada funciona el riego por goteo pero la longitud deberá reducirse conforme aumenta la pendiente.

Normalmente se utiliza para un ciclo de cultivo o máximo dos cuando no es enterrada la cintilla y no tiene mucho daño por roedores o insectos. En suelos arenosos la cintilla no debe enterrarse, debido a que la humedad no sube por capilaridad ocasionando la muerte de las plántulas recién trasplantadas. Sin embargo, aún en suelos arcillosos muchos productores no entierran la cintilla, con el objeto de no tener problemas para recogerla al terminar el ciclo y reutilizarla.

Arellano et al. (2004) el sistema de riego por cintillas, satisface las necesidades hídricas de las plantas, mediante el empleo de tuberías rígidas o flexibles de diversos calibres las cuales tienen adherido el gotero responsable de la aplicación del agua. Este sistema presenta un alto grado de eficiencia en el uso del agua y una de sus más destacadas características lo representa el hecho de irrigar grandes superficies con volúmenes pequeños de agua, que al hacerlo de la forma tradicional (por riego rodado) sería imposible de llevarse a cabo.

En relación a las marcas presentes en el mercado, las más comunes de encontrar son: T-Tape, Aqua Traxx, Ro-Drip, Queen fit y Chapin. Las características más importantes que se deben tener en cuenta el momento de ver una cinta de riego es el espesor de sus paredes ya que es una factor de calidad importantísimo, su

flujo interno, ya que este da la longitud de cinta que se puede ocupar y para que esta no pierda presión al final.

También es muy importante la salida que tenga, relacionado con este aspecto está ligado el tipo de gota que emita la cinta para que no produzca algún problema en el suelo y por último se tiene el lugar donde se ocupe, ya que no es lo mismo un cultivo al aire libre que un invernadero.

Muños (2004) las cintas, son tuberías flexibles capaces de tomar una forma plana, provistas de puntos de emisión espaciados a distancias variables, y que consisten en dos conductos paralelos, uno principal del cual el agua pasa al secundario a través de un orificio que provoca una primera pérdida de carga, y uno secundario del cual el agua sale al exterior. Su uso, generalmente, está enfocado a cultivos de marco de plantación muy estrechos que requerirían una gran densidad de goteros. López, *et al*, (1992), citado por Muños (2004) plantea que las cintas emisoras están, frecuentemente, fabricadas a base de PE, de espesor variable, por lo que convendrá cerciorarse de que su precio esté relacionado con su vida útil. Además existen los siguientes tipos:

- ✓ Mangueras porosas o de rezume. En ellas el agua sale al exterior a través de material poroso. Su vida útil es corta y muy sensible a obturaciones.
- ✓ Mangueras tipo “Bi – wall”. Constan de dos tubos excéntricos o adyacentes. El agua circula por uno de ellos y pasa a través de unos pequeños orificios al segundo tubo, desde donde sale al exterior por otras perforaciones. Suelen ser de polietileno de distinto espesor, lo que influye en su vida útil. Estas cintas presentan el grosor de sus paredes en unidades llamada “mil” (1 mil = 0,001 pulgada).
- ✓ Mangueras corrugadas. Formadas por dos tuberías concéntricas, la exterior lisa y la interior corrugada, dejando entre ambas un conducto, de pequeño

diámetro, a modo de resorte. Su funcionamiento hidráulico es similar al de un gotero de orificio, pero con la particularidad de que su sección de salida aumenta con la presión hidráulica interior en función de la elasticidad de la pared de la tubería.

- ✓ Mangueras perforadas. Son tuberías de PE, generalmente de poco espesor, con perforaciones esparcidas uniformemente, de forma lineal en sentido axial o circulares.
- ✓ Otros tipos. Otros tipos de mangueras llevan una solapa en toda su longitud, con unos circuitos, generalmente impresos, tipo laberinto, que a intervalos regulares se comunican con la cámara interior que actúa como tubo para la conducción de agua, y ésta, tras circular por los conductos, sale al exterior. Estos circuitos actúan, pues, como goteros.

2.7 Procedimiento para el diseño del riego por goteo

En el diseño del riego por goteo, la hidráulica del riego desempeña la parte más importante; ya que de su análisis depende en gran medida la buena operación y funcionamiento del sistema. La hidráulica del riego por goteo.

Contempla la selección y análisis de los diferentes diámetros de tuberías teniendo como base principal la economía sin que se alteren las características ideales del riego: como el mejorar la distribución y uniformidad del agua; así mismo, la hidráulica incluye en si el conocimiento de las pérdidas de carga que ocurren en el sistema, dentro de estas se tienen: Carga de operación de la unidad, Pérdidas de la carga por fricción en la red de tuberías, Pérdidas de carga locales en codos, reducciones y otros, Pérdidas de carga en el cabezal en filtros, válvulas, dosificadora, pérdida de carga por desnivel, Rojas y Briones (2001).

2.8 Calculo de laterales

Los laterales son las tuberías que distribuyen el agua a las plantas por medio de los emisores acoplados a ellas. La aportación de agua por los emisores deberá ser lo más uniforme posible, es decir, todos los emisores deberán aplicar aproximadamente la misma cantidad de agua, por lo que la uniformidad constituye el punto de partida del diseño hidráulico de cualquier instalación de riego localizado. Para lograr una buena uniformidad serán necesarias dos condiciones de diseño:

1. Que todos los emisores de la instalación sean de buena calidad, garantizados por el fabricante y que cumplan las normas de calidad.
2. Que la presión del agua en todos los emisores sea lo más parecida posible, para lo que habrá que dimensionar la red correctamente.

Esta segunda condición es la más complicada de conseguir. Para conseguir que la presión del agua en todos los emisores sea lo más parecida posible hay que aplicar un criterio de cálculo llamado Criterio de Christiansen también llamado genéricamente criterio hidráulico.

2.8.1 Criterio hidráulico

El Criterio Hidráulico empleado dice que en una subunidad de riego se admite una variación máxima de caudal entre los distintos emisores del 10% del caudal medio. Con esta condición, las variaciones admisibles de presión vienen dadas por la fórmula:

$$dH = \frac{0.1}{x} \cdot H$$

$dH = \text{variacion maxima de la presion}$

$H = \text{presion de trabajo del emisor}$

$x =$ Exponente de descarga del emisor

Para poder entender mejor este criterio a continuación se presenta el siguiente ejemplo:

Un gotero tiene un caudal medio de 3,5 litros/hora a una presión de 6 mca. Con la condición de que las variaciones de caudal de los goteros no sobrepasen el 10 % del caudal medio, calcular la variación máxima de presión para los siguientes valores del exponente de descarga: $x = 1, x = 0.5$

Solución:

$$dH = \frac{0.1}{x} \cdot H$$

$$dH_1 = \frac{(0.1)(6)}{1} = 0.6mca$$

$$dH_2 = \frac{(0.1)(6)}{0.5} = 1.2mca$$

En todos los casos las variaciones máximas de caudal serán: $3,5 * 0,10 = 0,35$ litros/hora.

A la vista de los resultados obtenidos en el ejemplo anterior se sacan las siguientes conclusiones:

- Para $x = 1$ las variaciones máximas de la presión deben ser pequeñas, lo que obliga a unas líneas cortas de laterales en cada subunidad o a un gran diámetro de las mismas.
- Para $x = 0.5$ las variaciones de presión en los goteros pueden ser de mayor magnitud, lo que permite una mayor longitud y un menor diámetro de los laterales.

Se ha comprobado que el coste mínimo de la instalación ocurre cuando el 55 % de las pérdidas admisibles en la subunidad se producen en los laterales, mientras que el 45% restante se produce en las tuberías terciarias o porta laterales (criterio

económico). Con esta condición, las pérdidas de carga admisibles en un lateral horizontal vienen dadas por la fórmula:

$$h_{r \text{ admisible lateral}} = (55\%)(dH) = (0.55) \left(\frac{0.1}{x} \right) (H) = \left(\frac{0.055}{x} \right) (H)$$

Este valor admisible de las pérdidas de carga debe ser, como máximo, igual a las pérdidas de carga que se producen en el lateral:

$$h_r = (J)(F)(L_f)$$

h_r = pérdidas de carga en lateral, en mca

J = pérdidas de carga unitaria, en mca / m lineal

F = factor de Christiansen

L_f = longitud ficticia, en m

Para calcular el diámetro de un lateral horizontal de una subunidad de riego por goteo se tienen que reunir los datos siguientes:

- Longitud de lateral: 40 m.
- Separación de goteros. 1 m.
- Distancia del primer gotero al origen del lateral: 1 m.
- Caudal de los goteros: 4 litros/hora.
- Presión de trabajo de los goteros. 10 mca.
- Exponente de descarga: 0,70.
- Longitud equivalente de conexión del gotero: 0.20 m.

Para calcular el caudal en el origen de la lateral

- Q = Número de goteros x Caudal de cada gotero = $40 \cdot 4 = 160$ litros/hora
- Longitud ficticia de lateral:
- L_f = Longitud real + Longitud equivalente = $40 + 40 \cdot 0,2 = 48$ m

- Se elige una tubería de polietileno de baja densidad y se comprueba si la pérdida de carga esta dentro de los límites admisibles. Elegimos la tubería normalizada de diámetro exterior 16 mm (diámetro interior 13,2 mm y presión 2,5 atmósferas).

Perdida de carga:

$$h_r = (J)(F)(L_f)$$

Para el cálculo de J se utiliza el diagrama de pérdida de carga en PEBD. Para un caudal de 0,16 m³/hora, la tubería 16mm (diámetro interior 13,2) tiene una pérdida de carga de 1,6 mca/100 m. Por tanto, J = 0,016 mca/m.

Factor de Christiansen $F = 0.376$. Según tabla 3.10 (tema 3) para $l_0 = 1, \beta = 1.75$ y $n = 40$.

Sustituyendo valores: $h_r = (0.016)(0.376)(48) = 0.28mca$

Pérdidas de carga admisible en el lateral:

$$h_{r \text{ admisible lateral}} = \frac{(0.055)(10)}{0.7} = 0.78mca$$

La pérdida de carga es inferior a la admisible. Luego la tubería elegida es válida. Ensayando la tubería de diámetro exterior 12 mm (diámetro interior 10,3 mm y presión 2,5 atmósferas) se comprobaría que no es válida.

La presión necesaria en el origen del lateral porta gotero, viene dada por la ecuación:

$$H_0 = H + 0.73(h_r) \pm \frac{\Delta Z}{2}$$

H_0 = presión en el origen del ramal

H = presión media en el lateral, que debe coincidir con la presión no mín al del emisor

h_r = pérdida de carga en el ramal

ΔZ = desnivel geométrico entre los extremos del ramal. se toma signo positivo (+) cuando el desnivel es ascendente, y negativo (-) cuando el desnivel es descendente.

En el ejemplo anterior, el final del lateral está a una cota 1,20 m más alta que el principio del mismo. Calcular la presión necesaria en el origen del lateral.

Solución

$$H_0 = H + 0.73(h_r) \pm \frac{\Delta Z}{2} = 10 + 0.73(0.28) + \frac{1.20}{2} = 10.80 \text{ mca}$$

2.9 Longitud de las laterales de riego

La longitud de las tuberías laterales está condicionada entre otros factores, por la topografía del terreno, siendo menor la longitud del lateral cuando la pendiente es ascendente pudiéndose aumentar a medida que la pendiente es menor y se hace descendente.

Evidentemente, al variar los datos técnicos (diámetro de la tubería, caudales y presiones) y aun manteniendo las pendientes indicadas en el cuadro 2.1, obtenida de una tubería comercial y proporcionada por el fabricante, las longitudes máximas de los laterales serán distintas. Al variar los datos técnicos y manteniendo las pendientes, las longitudes máximas de las laterales serán distintas.

Cuadro2. 1. Variación de la longitud de las laterales con la pendiente del terreno.

Datos técnicos de la cintilla	
Diámetro: 20 mm. Caudal: 4 l/h. Presión: 1.4 kg/cm ² . Separación emisores: 1 m.	
Pendiente del terreno	Longitud máxima del lateral
Ascendente al 2%	100 metros
Sin pendiente	140 metros
Descendente al 2%	170 metros

En aquellos terrenos que presentan una pendiente muy elevada, se aconseja seguir la norma de instalar laterales siguiendo aproximadamente las curvas de nivel, como se ve en el cuadro 2.1, y las tuberías terciarias o porta laterales siguiendo la pendiente, disponiendo reguladores de presión en aquellos lugares donde se requieran.



Figura 2. 2. Laterales de riego por goteo siguiendo las curvas de nivel.

En caso de que la pendiente sea muy acusada o irregular, habrá que recurrir a utilizar goteros autocompensantes, al objeto de mantener constantes la presión de trabajo del emisor y el caudal suministrado. Así, usando emisores autocompensantes e independientemente de la longitud del terreno, se pueden ampliar las longitudes máximas de los laterales de riego, como podemos ver en el cuadro 2.2 Con este tipo de goteros la longitud máxima del lateral se puede ampliar independiente de la topografía del terreno.

Cuadro 2. 2. Variación de la longitud de las laterales en función de la autocompensación de los emisores.

Datos técnicos de la cintilla	
Diámetro: 16 mm. Caudal: 4 l/h. Presión: 2 kg/cm ² . Separación emisores: 1 m.	
Tipo de gotero	Longitud máxima del lateral
No autocompensante	95 metros
Autocompensante	210 metros

Debido a las pérdidas de carga y a la pendiente del terreno, en cada una de las subunidades de riego van a producir diferencias de presión entre los distintos emisores de las tuberías laterales.

Por lo tanto, la presión de entrada en la subunidad de riego debe ser tal que el emisor que está sometido a menor presión reciba la suficiente para suministrar el caudal adecuado, es por lo que se aplica el criterio hidráulico, anteriormente explicado. Para que la presión de entrada en cada subunidad sea similar y no varíe durante el riego, es preciso instalar un regulador de presión al principio de cada tubería terciaria.

Otros factores que hacen variar la longitud del lateral de riego es el diámetro del lateral de riego, que por lo general suele ser de 16 mm y de 20 mm. A mayor diámetro se reducen las pérdidas de carga, por lo tanto se podría aumentar la longitud de los laterales, como podemos ver en el cuadro 2.3, de una lateral comercial por el fabricante, pero el coste de la instalación se elevaría.

Cuadro2. 3. Relación diámetro de la tubería y la longitud máxima del lateral.

<p>Mayor diámetro lateral puede \Rightarrow menor perdidas de carga \Rightarrow la longitud del lateral puede aumentar</p>	
<p>ejemplo:</p> <p style="text-align: center;">Caudal: 4 l/h. Separación emisores: 1 m.</p>	
Diámetro tubería lateral	Longitud máxima del lateral
16 mm	150 metros
20 mm	200 metros

El caudal del emisor también condiciona la longitud del lateral, de tal forma que cuanto mayor sea el caudal del emisor, menor será la longitud del lateral, como se muestra en el cuadro 2.4, de un lateral de riego con goteros incorporados de distinto caudal.

Cuadro2. 4. Relación caudal del emisor y la longitud máxima del lateral.

<p>Mayor caudal \Rightarrow menor longitud del lateral</p>	
<p>Ejemplo:</p> <p style="text-align: center;">Diámetro del lateral: 16 mm. Separación emisores: 1 m.</p>	
Caudal del gotero	Longitud máxima del lateral
2 l/h	150 metros
4 l/h	95 metros

La distancia entre emisores también condiciona la longitud del lateral, de tal manera que cuanto más distanciados estén los emisores, mayor longitud podrá tener la tubería lateral, como se muestra en el cuadro 2.5, de un lateral de riego con goteros incorporados separados a distinta distancia.

No obstante, conviene recordar que la distancia entre emisores, el caudal que suministran y la distancia entre tuberías, no es arbitraria sino que se determina en función del tipo de suelo, forma del bulbo húmedo que se desea conseguir y el marco o siembra del cultivo, y no se deben modificar por criterios hidráulicos aunque ello implique ahorro o comodidad.

Cuadro2. 5. Relación distancia del emisor y la longitud máxima del lateral.

Mayor distancia entre emisores \Rightarrow mayor longitud del lateral	
Ejemplo: Diámetro del lateral: 20 mm. Caudal: 4 l/h.	
Distancia entre emisores	Longitud máxima del lateral
50 cm	85 metros
100 cm	135 metros
150 cm	190 metros

Como resumen podemos decir que los factores que influyen en la longitud de un lateral de riego localizado son:

- Pendiente
- Autocompensación de los emisores (Coeficiente de descarga).
- Diámetro del lateral de riego.
- Caudal de los emisores.
- Separación de los emisores.

Cuadro2. 6. Influencia de las características técnicas en la longitud de los laterales.

Longitud aproximada de las tuberías laterales (metros)											
Caudal del emisor 2 l/h						Caudal del emisor 4 l/h					
Diámetro lateral 16 mm			Diámetro lateral 20 mm			Diámetro lateral 16 mm			Diámetro lateral 20 mm		
Distancia emisores (m)			Distancia emisores (m)			Distancia emisores (m)			Distancia emisores (m)		
0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
90	150	200	140	200	260	60	95	120	85	135	190

En el cuadro 2.6 se muestran las longitudes máximas de un lateral en función de las características técnicas de una tubería lateral comercial, que debe de ser proporcionada por el fabricante para un buen diseño de la instalación de riego localizado.

2.10 Aspectos hidráulicos de goteros y cintas de riego

Santos et al. (2010) especifica que las características hidráulicas de cada emisor están directamente relacionadas con el régimen de flujo del agua cuando ésta atraviesa el emisor, el cual se caracteriza por el número de Reynolds.

Toro Micro-Irrigación (s.f) comentan que hay características de los emisores que afectan directamente la máxima variación de presión permisible que podemos tener dentro de un bloque de riego para una uniformidad de emisión de riego buscada y estos son:

- Uniformidad Emisión.
- Coeficiente de Variación de Manufactura.
- Uniformidad Emisión del Coeficiente de Variación de Manufactura.
- Exponente del emisor.

2.10.1 Relación caudal – presión

El caudal que descarga un emisor está relacionado con la presión hidráulica existente a su entrada, por la siguiente ecuación.

$$q = K * h^x$$

Donde:

q = caudal del emisor (L³h⁻¹).

K = coeficiente de descarga (adimensional).

h = presión a la entrada del emisor (m.c.a.).

x = exponente de descarga (adimensional).

K y x son característicos de cada emisor, los debe proporcionar el fabricante o se pueden obtener a partir de la curva q – h o de la tabla. Estos valores también se pueden obtener aplicando las siguientes ecuaciones:

$$x = \frac{\ln(q_1/q_2)}{\ln(h_1/h_2)} \qquad K = \frac{q_1}{h_1^x}$$

El exponente de descarga x, es una medida de la sensibilidad de los emisores a la variación de presión.

La relación caudal - presión se puede representar gráficamente con el caudal en ordenadas y la presión en abscisas, como lo muestra la siguiente figura.

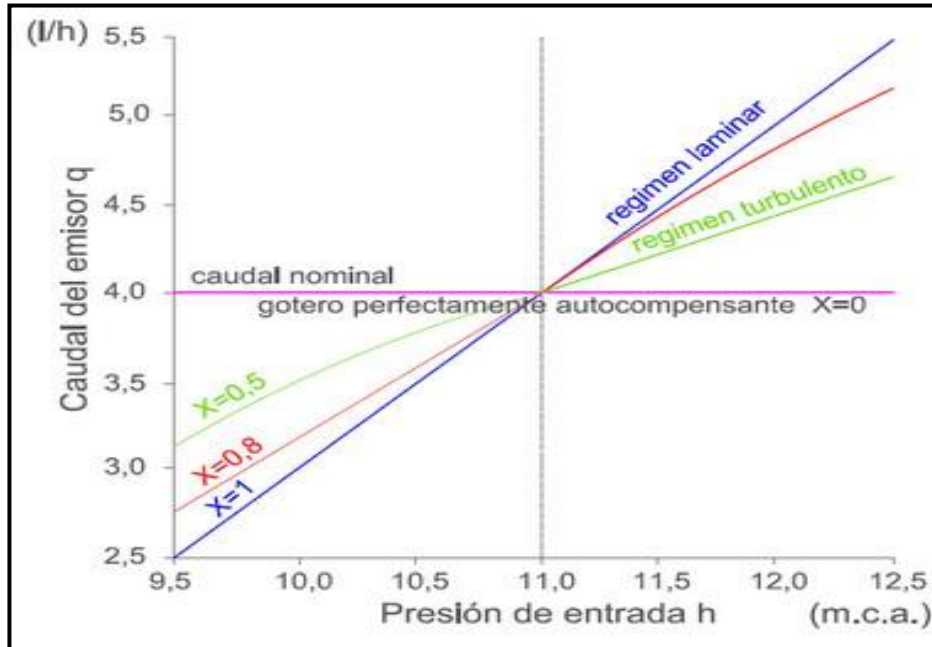


Figura 2. 3. Relación caudal–presión.

Cuanto menor sea el valor de x , la curva que representa tenderá hacia la horizontal, un emisor que tuviera una $x = 0$ tendría como curva, una recta horizontal paralela al eje de las abscisas desde una determinada presión, su caudal sería constante e independiente de la presión. Por lo contrario otra emisor con una $x = 1$, su curva también sería una línea recta a 45° que pasaría por el origen. Su caudal variaría en la misma proporción que la presión. Muchas cintillas de goteo tienen un exponente aproximado de 0.5. Como una regla para un diseño hidráulico apropiado, las variaciones en el gasto no deberán ser mayores del 10 por ciento.

2.10.2 Uniformidad

Muños (2004) señala que la uniformidad es una magnitud que caracteriza a todo sistema de riego y que además interviene en su diseño, tanto en el agronómico, como en el hidráulico. Niveles altos de uniformidad, incidirán notablemente en la eficiencia de riego, ya que de esta depende el agua que se suministra a unas plantas y a otras, lo que repercutirá en los rendimientos de manera significativa.

Toro Micro-Irrigación (s.f) evalúa la uniformidad con que cada uno de los emisores nuevos proporcionará el gasto y está en función del Coeficiente de Variación de Manufactura (CV) y de la variación en presión.

Ecuación para calcular la uniformidad de emisión:

$$UE = 1 - \frac{1.27Cv}{\sqrt{n}}(Qm/Qa)$$

Donde:

UE = Uniformidad de Emisión.

n = Numero de emisores por planta.

Cv = Coeficiente de variación de fabricación del emisor.

Qm = Gasto mínimo del emisor a la presión mínima.

Qa = Gasto medio del emisor a la presión media.

2.11 Factores que afectan el Coeficiente de Emisión (UE)

Varios son los factores que afectan a este coeficiente, entre estos están:

- a) Constructivos.
- b) Hidráulicos.
- c) Envejecimiento y obturaciones.
- d) Diferencias de temperatura.

2.11.1 Coeficiente de variación de fabricación (Constructivos)

Los procesos de fabricación y los materiales utilizados hacen que emisores de un mismo modelo, no sean exactamente iguales entre si y proporcionen caudales diferentes para una misma presión de trabajo. Además, existen en el mercado diferentes tipos y calidades de emisores cuyo funcionamiento en el tiempo es muy variable.

El cálculo de este coeficiente, desde un enfoque estadístico, se puede realizar por medio de la desviación típica, la cual se define como la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de las desviaciones respecto a la media:

$$CV = \frac{\sigma q}{q_m}$$

Desviación típica

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (q_i - q_m)^2}{n}}$$

q_m = media de caudales de la muestra a presión de trabajo.

q_i = cada uno de los caudales medidos

n = total de emisores evaluados.

En las normas UNE e ISO la clasificación de los emisores se realiza únicamente en dos grupos: Categoría de uniformidad A y B de acuerdo con la siguiente tabla.

Cuadro2. 7. Clasificación de emisores según normas ISO y UNE.

Categoría de Uniformidad	Para la presión nominal desviación del caudal con respecto a q_{nom}	Coeficiente de variación de fabricación CV
A	≤ 5 %	≤ 5 %
B	≤ 10 %	≤ 10 %

Según López (2010) opina que el estándar americano refleja mucho mejor que las normas ISO y UNE la realidad del mercado, sobre todo en lo referente a las tuberías emisoras. Difícilmente pueden encontrarse comercializadas tuberías emisoras de una campaña que tengan los parámetros anteriores inferiores al 10 %, lo normal es que los superen ampliamente y es por ello que en el estándar ASAE se admiten valores de hasta el 20 %.

Cuadro2. 8. Clasificación de emisión según norma ASAEP405.1 Para goteros, micro aspersores y difusores (según López, et, 1992 citado por Muños 2004).

Coefficiente de variación %	Clasificación del emisor
<5	Excelente
5-7	Normales
7-11	Marginales
11-15	Deficientes
>15	Inaceptables

Cuadro2. 9. Clasificación de emisores según norma ASAE EP405.1 Para tuberías emisoras. (Según López, et, 1992 citado por Muños 2004).

Coefficiente de variación %	Clasificación del emisor
<10	Buenas
10-20	Normales
>20	Deficientes e inaceptables

Cuadro2. 10. Valores de Coeficiente de Uniformidad de Caudales (CUC) (citado por Villavicencio y Villablanca).

Funcionamiento	CUC
Excelente	90-100%
Buena	80-90%
Aceptable	70-80%
Inaceptable	< 70%

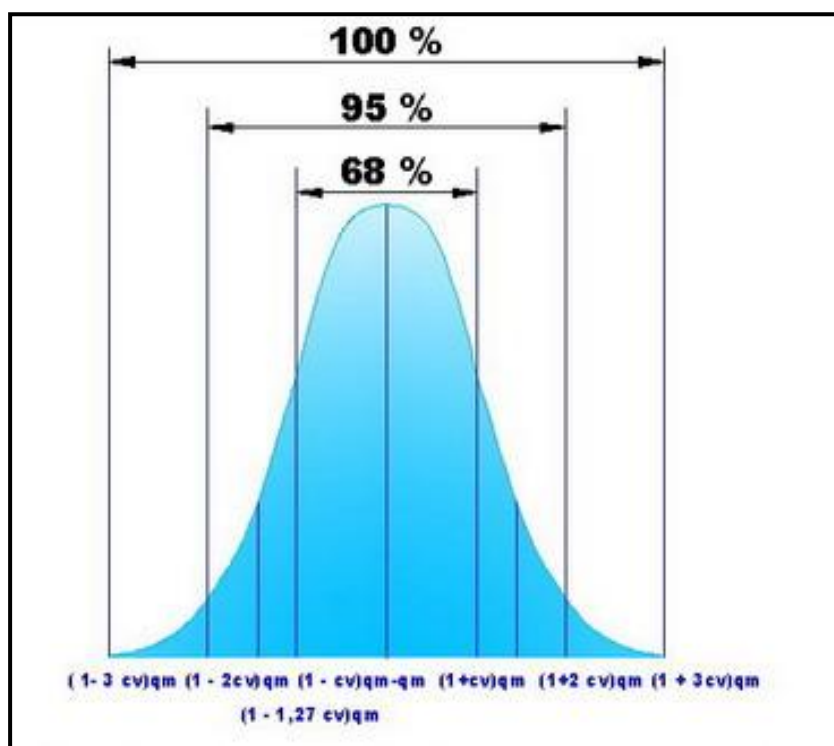


Figura 2. 4. Distribución normal del caudal del emisor.

El significado estadístico del coeficiente de variación será:

- Prácticamente todos los caudales observados en el ensayo están comprendidos en el entorno $(1 \pm 3 CV) q$.
- Aproximadamente el 95 % de las observaciones se encuentran comprendidas en el entorno $(1 \pm 2 CV) q$.
- Si se toman el 25 % de las observaciones de valor más bajo, su media será aproximadamente igual a $(1 - 1,27 CV) q$.
- El 68 % de las observaciones realizadas estarán en el intervalo $(1 \pm CV) q$.

2.12 Efecto del coeficiente de variación en la uniformidad del riego

En relación con la uniformidad del riego se tiene que estadísticamente, partiendo de una distribución normal de los caudales, si se toman e 25% de los caudales más bajos, su valor medio, es decir lo que antes se llamó q_{25} es:

$$q_{25} = (1 - 1.27CV) = CUF$$

Para la determinación del CU se toman los factores de fabricación e hidráulicos.

En este caso:

$$\frac{q_{25}}{q_m} = (1 - 1.27CV) = CUF$$

Donde CU_f determina como el factor de fabricación influye en el CU. Puede apreciarse que cuanto mayor es CV menor es la uniformidad. Llamando "ne" al número de emisores de los que recibe agua una misma planta, cuanto mayor sea "ne" menor es la posibilidad de que todos los emisores que aportan agua a una planta pertenezcan al 25% de caudal más bajo. En este caso la fórmula anterior se transforma en:

$$CU_f = \left(1 - \frac{1.27CV}{\sqrt{ne}}\right)$$

2.13 Gradiente hidráulico

El gradiente hidráulico es por definición la pérdida de carga por unidad lineal de recorrido en la corriente. Carga es la energía por unidad de peso del fluido, resultando por lo tanto que el gradiente es adimensional.

$$\text{gradiente hidraulico} = \frac{\text{carga}}{\text{recorrido}} = \frac{m}{m} = \text{adimensional}$$

En una instalación de riego los caudales no son los mismos en todos los emisores debido a las diferencias de presiones a que se encuentran sometidos que a su vez dependen de los desniveles topográficos y las pérdidas de carga en la red de riego. En una subunidad de riego rectangular y sin pendientes el esquema de presiones se describe en el grafico.

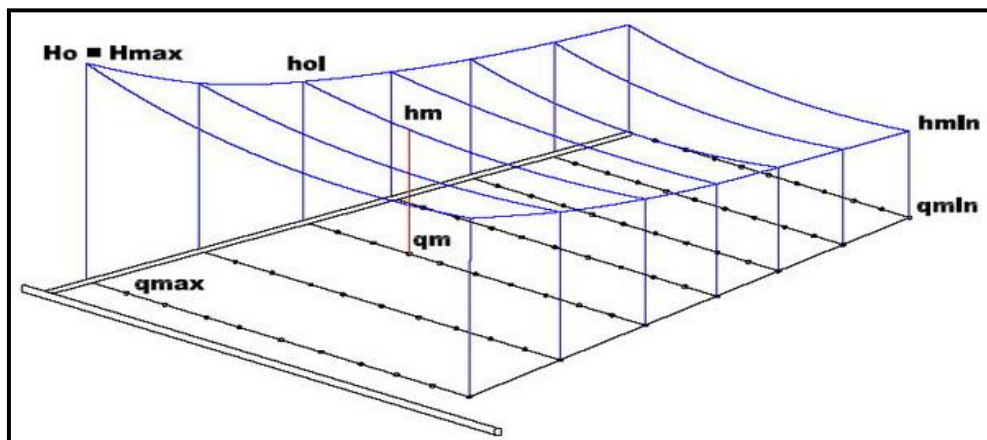


Figura 2. 5. Simulación del gradiente hidráulico.

Donde:

$H_0 = H_{max}$ = Es la presión al inicio del campo en la distribuidora o terciaria.

q_{max} = Es el máximo caudal de un gotero en el campo de riego.

h_{ol} = Es la presión al inicio del lateral situado en el punto de presión media de la distribuidora.

h_m = Es la presión media de todos los goteros del campo.

q_m = Caudal medio.

h_{min} = Presión mínima de un gotero.

q_{min} = Caudal mínimo de un gotero.

De esta forma el coeficiente de uniformidad CU_h que incluye solamente los factores hidráulicos se expresa por:

$$CU_h = \frac{q_{min}}{qm}$$

En una instalación de riego se deben tener en cuenta los factores de fabricación del emisor como los factores hidráulicos quedando la formula expresada en función de estos dos factores como sigue.

$$CU = \left(1 - \frac{1.27CV}{\sqrt{n}}\right) \frac{q_{min}}{qm}$$

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Desarrollo del modelo

El método empleado para realizar la simulación del gradiente hidráulico en las líneas regantes de goteo es el método del elemento finito este método se aplico para resolver el algoritmo lógico matemático en una rutina que se arranca o se reinicia desde el ultimo emisor hasta el primero. El algoritmo comprende los siguientes principios hidrodinámicos clásicos en el estudio del agua en movimiento:

- a) Ecuación del gasto del emisor.
- b) Método de la longitud equivalente.
- c) Teorema de Continuidad.
- d) Teorema de energía de Bernoulli.
- e) Conversión de unidades.
- f) Ecuación de uniformidad de emisión.

Los datos de entrada necesarios de las diferentes líneas regantes por goteo involucrados en la simulación del gradiente hidráulico por el método del elemento finito son las siguientes:

- a) Diámetro interno de la manguera ID en mm, b) Separación entre los emisores Se en m, c) desnivel topográfico en cada tramo Az en m, siendo + si es descendente y – si es ascendente, d) Número total de emisores Ne dispuestos en la longitud completa de la línea regante, e) Coeficiente K del emisor calibrado para obtener gasto “qi” en LPH ingresando la carga “Hi” en m, f) Exponente x de gasto para el emisor y g) Carga de presión Hn para el ultimo emisor en m, tal carga “Hn” es propuesta por el diseñador considerando el escenario.

3.2 Aplicación del modelo

Para poder realizar la simulación del gradiente hidráulico, se consulto las características técnicas de las diferentes cintillas, para comparar las uniformidades de emisión del catálogo contra la calculada del modelo del elemento finito.

Cuadro3. 1. Características técnicas de la cinta de goteo.

CARACTERISTICAS DE LA CINTA MARCA: TORO AG			
Modelo	Aqua-Traxx	Longitud max (m)	200
qi (lph)	0.49	UE (%)	90
Presión (mca)	5.606523955	ID (mm)	16
Se (m)	0.2	X	0.52
CV %	0.03	K	0.199928803
N. emisores	1000	Pendiente (%)	0

En el cuadro 3.1 anterior se tiene un ejemplo de las características de la cinta de riego por goteo, que se anotaron en la plantilla de Excel, para luego utilizarlas en las ecuaciones hidrodinámicas establecidas para este modelo. Estos datos fueron consultados en los diferentes catálogos de las compañías más competitivas que existen en el mercado como son: T-Systems International (T-Tape), ToroAg (Aqua-Traxx) y Chapin Watermatics (Twin-wall), existes otros tipos de cintillas comerciales como: Netafim (Streamline y Thyphoon), Rainbird (Raintape TPC), Roberts Irrigation Products (RO-DRIP), Nelson Irrigation Corp (Pathfinder) y Queen-Gil con las cuales también se pueden probar el modelo.

Cuadro3. 2. Coeficientes de variación del gasto (CVq) y los valores del exponente (x) de la ecuación carga-gasto para diferentes cintillas de goteo.

Cintilla de goteo	CVq (%)	X
T-Systems International (T-Tape)	3	0.5 a 0.52
Netafim (Streamline y Thyphoon)	3	0.44 a 0.48
Rainbird (Raintape TPC)	2	0.4
Roberts Irrigation Products (RO-DRIP)	3	0.52 a 0.57
ToroAg (Aqua-Traxx)	2 a 4	0.50 a 0.54
Chapin Watermatics (Twin-wall)	1 a 3	0.51 a 0.58
Nelson Irrigation Corp (Pathfinder)	2.5	0.48
Queen-Gil	5	0.56
Eurodrip	1 a 2	0.53 a 0.60

De acuerdo a la norma mexicana de requisitos mecánicos y funcionales de cintas de goteo para su instalación y operación en campo, Especificaciones y Métodos de Prueba NMX=E=225 (1998) el coeficiente de variación (CVq) del gasto de emisión no debe exceder del cinco por ciento para la categoría A, ni más del 10 por ciento para la categoría B.

Después de recolectar los datos técnicos de las diferentes cintillas comerciales de riego se procede a diseñar una plantilla en Excel e introduciendo las distintas ecuaciones hidrodinámicas sobre el estudio del agua.

Cuadro3. 3. Diseño de la plantilla en Excel.

	A	B	C	D	E
1	NUMERO DE EMISOR	GASTO CINTA (LPS)	GASTO EMISOR (LPH)	PERDIDAS DE CARGA EN (MCA)	CARGA DEL EMISOR (MCA)
2	0				
3	1				
4	2				
5	3				
6	4				
7	5				
8	6				
9	7				
10	8				
11	9				
12	10				
13	11				
14	12				
15	13				
16	14				
17	15				
18	16				
19	17				
20	18				
21	19				
22	20				
23	21				
24	22				
25	23				
26	24				
27	25				
28	26				
29	27				
30	28	0		0	Hn

En el cuadro 3.3 se representa la plantilla que se diseño en Excel, para realizar la simulación del gradiente hidráulico. Este tipo de plantilla se aplicó para todos los diferentes tipos de cintillas comerciales.

Los pasos que se llevaron a cabo para realizar la simulación del gradiente hidráulico mediante un algoritmo lógico-matemático aplicando el método del elemento finito, fueron los siguientes:

- Ingresar datos de entrada (especificaciones técnicas de la cinta, exponente x del emisor, variación de manufactura y factor de Hazen) para el arranque del algoritmo matemático.
- Proporcionar la carga de operación de la cinta (H_n) al final de la lineal de goteo. Es decir en la columna E30 en un rango de 3 a 10 mca.
- Teclar cero y cero en las columnas: B30 Y D30 para indicar que después del último emisor el flujo de la cinta es cero esto indica que está cerrada la línea.
- Calcular el caudal del último emisor en C30 aplicando la ecuación del emisor.
- Se determina el gasto conducido en la cinta de goteo para determinar la fricción por tramo en la simulación hidráulica acumulando el gasto de la cintilla del tramo anterior más el gasto del emisor “j” en lps, según el teorema de la continuidad.
- Calcular la pérdida de carga debido a la fricción aplicando la ecuación de Hazen Williams por tramo para luego realizar el balance de energía en cada elemento finito.
- Obtener la carga de presión para el siguiente emisor aplicando el teorema de Bernoulli entre dos emisores uno ya procesado y el otro en proceso.
- Repite la rutina desde el último emisor hasta el emisor cero.
- Determinar el gasto promedio de la cinta de goteo y el gasto mínimo para evaluar la UE% calculada.
- Comparar la UE% calculada contra UE% de catálogo.

El análisis hidráulico se aplicó por tramos de tubería de longitud equivalente al espaciamiento entre emisores, empezando desde el último emisor y continuando con el penúltimo, antepenúltimo, etc. Sobre la tubería en contra del flujo hasta llegar al primero, donde termina la simulación del gradiente.

El inicio del proceso requirió la entrada de datos para el último emisor, a partir de los cuales se fueron calculando sucesivamente el resto de los datos p_j y q_j para todos los emisores de la línea.

Este procedimiento de algoritmo matemático desarrollado por incrementos finitos está estructurado en base los principios de continuidad, el teorema de energía (o de Bernoulli), el cálculo de la pérdida de carga por tramos con la ecuación Hazen-Williams y la ecuación del emisor.

3.2.1 Descripción de las Ecuaciones utilizadas para el desarrollo del algoritmo matemático

Para determinar el gasto del gotero se utilizó la siguiente ecuación:

$$q = K * h^x$$

Donde:

q = caudal del emisor (L^3/h).

K = coeficiente de descarga (a dimensional).

h = presión a la entrada del emisor (m.c.a.).

x = exponente de descarga (a dimensional).

Para determinar los coeficientes de X y K se aplican las siguientes ecuaciones:

$$x = \frac{\ln(q_1/q_2)}{\ln(h_1/h_2)} \quad K = \frac{q_1}{h_1^x}$$

Donde:

ln = logaritmo natural (a dimensional).

h₁ = presión uno (mca).

q₁ = gasto uno (L^3/h).

h₂ = presión dos (mca).

q₂ = gasto dos (L^3/h).

Para calcular las pérdidas de carga se utilizó la ecuación de Hazen-Williams para la tubería completa analizada por tramo.

$$H_{fl} = \frac{1.21 * 10^{10}}{\phi^{4.87}} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} L F$$

$$h_{fl} = 1.8225538 * S_e * Q_p^{1.852}$$

En donde: h_{fl} = pérdidas de carga por tramo debido a fricción en mca, S_e = espaciado entre goteros en m, Q_p = gasto de la cinta en lps y 1.8225538= factor numérico constante por construcción para los datos de la cinta que no varían durante la simulación como son el diámetro “Ø” y el factor “C” de Hazen

También se utilizó la ecuación de continuidad para calcular el gasto que conducen las cintas para alimentar los goteros. Y se puede representar de la siguiente manera:

$$Q_p = \sum(\text{gasto de los emisores})$$

Esta ecuación indica que todo lo que entra de caudal tiene que igualar al caudal descargado por los goteros.

El Teorema de Bernoulli se aplicó para obtener la carga de presión sucesivamente para cada emisor. Y esta dada por la siguiente ecuación:

$$P_1 + \frac{V^2}{2g} + Z_1 = P_2 + \frac{V^2}{2g} + Z_2 + H_f$$

Donde: P_1 = energía por presión, $\frac{V^2}{2g}$ = energía por velocidad, Z_1 = energía por posición y H_f = pérdida de carga debido a fricción.

Para determinar la uniformidad de emisión se aplicó la siguiente ecuación sugerida por el Servicio de Conservación de Suelos de USA y aprobado por la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas.

$$UE = 100 \left(1 - \frac{1.27Cv}{\sqrt{n}} (qm/qa) \right)$$

Donde:

UE = Uniformidad de Emisión en %.

n = Número de emisores por planta (se asume igual a 1).

Cv = Coeficiente de variación de fabricación del emisor.

qm = Gasto mínimo para la cuarta parte más baja del gradiente.

qa = Gasto promedio para todo los goteros de la cinta analizada.

3.3 Validación del modelo

Es para verificar que las estimaciones de los parámetros, los supuestos del modelo y la lógica en la programación resulten congruentes con las observaciones de los catálogos de los fabricantes. La desviación entre datos observados y las predicciones del modelo fue apreciada en una comparación grafica y mediante pruebas de significancia estadística.

El grado de confianza en las predicciones del modelo fue evaluado aplicando la regresión lineal simple y la prueba de t-Student

Los pasos de la verificación del modelo fueron:

- a) Asegurar que el modelo representa las condiciones esperadas del gradiente hidráulico en cintas de goteo.
- b) Revisar que la lógica de la programación y los cálculos son correctos y cotejan con su algoritmo.
- c) Representar los pasos mediante un diagrama de flujo o una plantilla.
- d) Verificar que las predicciones del modelo son consistentes con los datos de entrada procesados.
- e) Aplicar un análisis de sensibilidad en los parámetros del modelo y en las entradas del modelo para identificar aquellos parámetros de más influencia en las predicciones y dar mayor precisión.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Cuadros de comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE% de catálogo para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con diferentes características técnicas de operación.

Cuadro 4. 1. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catálogo para diferentes pendientes del terreno para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con el gotero de 0.49 lph a espaciados de 20, 30, 40 y 60 cm entre goteros.

CINTA AQUA-TRAXX 16 MM			
LONGITUD	UE CALCULADA	UE CATÁLOGO	PENDIENTE
M	%	%	%
q= 0.49 LPH		PRESIÓN= 5.6065 MCA	
			Se = 20 cm
200	89.55637794	90	0
252	84.27790102	85	0
293	79.18002116	80	0
117	89.87612031	90	1
162	84.71093332	85	1
194	79.43422127	80	1
74	89.8692895	90	2
112	84.52577863	85	2
139	79.12979818	80	2
q= 0.49 LPH		PRESIÓN= 5.6065 MCA	
			Se = 30 cm
260	89.56424752	90	0
328	84.27455111	85	0
382	79.10985008	80	0
131	89.8925444	90	1
188	85.22395036	85	1
227	79.35102428	80	1
76	89.92409828	90	2
119	84.58560702	85	2
151	79.05822435	80	2

CINTA AQUA-TRAXX 16 MM			
LONGITUD	UE CALCULADA	UE CATÁLOGO	PENDIENTE
M	%	%	%
q= 0.49 LPH PRESIÓN= 5.6065 MCA Se = 40 cm			
313	89.60088414	90	0
395	84.27779809	85	0
460	79.14039282	80	0
139	89.90714992	90	1
204	84.66058769	85	1
250	79.29725415	80	1
78	89.85143904	90	2
123	84.49548069	85	2
158	79.00188222	80	2
q= 0.49 LPH PRESIÓN= 5.6065 MCA Se = 60 cm			
408	89.55717742	90	0
514	84.2768712	85	0
599	79.11391954	80	0
148	89.8774027	90	1
225	84.54358887	85	1
280	79.11102796	80	1
79	89.81765918	90	2
127	84.38529771	85	2
164	79.03385089	80	2

En el cuadro 4.1 se puede apreciar que la longitud máxima de la cinta de goteo es menor con pendiente en contra en comparación con la cinta a nivel, a menor gasto del gotero combinado con un mayor espaciado la longitud tiende a ser mayor. Los parámetros que influyen más en la UE% son el coeficiente de variación de manufactura (c.v), el exponente x y el gasto del gotero.

En las predicciones del modelo se apreció una diferencia del 0.53% en promedio menor que la UE % del catálogo reportada por el fabricante Toro Ag. (s.f.) consultado en (<http://www.toro.com.au/files/AquaTraxx%20%2016mm.pdf>).

Cuadro 4. 2. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catálogo para diferentes pendientes del terreno para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con el gotero de 0.76 lph a espaciados de 20, 30 y 40 cm entre goteros.

CINTA AQUA-TRAXX 16 MM			
LONGITUD	UE CALCULADA	UE CATÁLOGO	PENDIENTE
M	%	%	%
q= 0.76 LPH PRESIÓN= 5.6065 MCA se= 20 cm			
154	89.13132955	90	0
193	83.72932933	85	0
225	78.34344014	80	0
101	89.74061281	90	1
137	84.26772345	85	1
162	78.99756305	80	1
69	89.85703844	89	2
101	84.48838241	85	2
124	79.01242952	80	2
q= 0.76 LPH PRESIÓN= 5.6065 MCA se= 30 cm			
200	89.14267705	90	0
251	83.73243052	85	0
293	78.29926026	80	0
117	89.76824034	90	1
162	84.38179915	85	1
194	79.00249417	80	1
73	89.94653894	90	2
112	84.4060212	85	2
139	79.04072772	80	2
q= 0.76 LPH PRESIÓN= 5.6065 MCA se= 40 cm			
241	89.17858473	90	0
304	83.59400154	85	0
353	78.34818231	80	0
127	89.81313939	90	1
180	84.43266206	85	1
217	79.01394173	80	1
76	89.85901961	90	2
117	84.54218832	85	2
148	78.89430843	80	2

En el cuadro 4.2 se puede apreciar que la longitud máxima de la cinta de goteo es menor con pendiente en contra en comparación con la cinta a nivel, a menor gasto del gotero combinado con un mayor espaciado la longitud tiende a ser mayor. Los parámetros que influyen más en la UE% son el coeficiente de variación de manufactura (c.v), el exponente x y el gasto del gotero.

En las predicciones del modelo se apreció una diferencia del 0.84 % en promedio menor que la UE % del catálogo reportada por el fabricante Toro Ag. (s.f.) consultado en (<http://www.toro.com.au/files/AquaTraxx%20%2016mm.pdf>).

Cuadro 4. 3. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catalogo para diferentes pendientes del terreno para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con el gotero de 1.02 lph a espaciados de 10, 20, 30, 40 y 60 cm entre goteros.

CINTA AQUATRAXX 16 MM			
LONGITUD	UE CALCULADA	UE CATÁLOGO	PENDIENTE
M	%	%	%
1.02 LPH	PRESIÓN= 5.6065 MCA		se= 10 cm
81	89.15626337	90	0
120	83.62766181	85	0
119	78.18037127	80	0
65	89.48656595	90	1
85	83.82634662	85	1
99	78.53625852	80	1
52	89.77556928	90	2
71	84.27824167	85	2
84	78.93527003	80	2
1.02 LPH	PRESIÓN= 5.6065 MCA		se= 20 cm
127	89.15686815	90	0
161	83.42571189	85	0
187	78.09449182	80	0
90	89.6340803	90	1
120	84.12953457	85	1
141	78.94463722	80	1
65	89.77695472	90	2
93	84.315323	85	2
112	78.94511559	80	2

CINTA AQUATRAXX 16 MM			
LONGITUD	UE CALCULADA	UE CATÁLOGO	PENDIENTE
M	%	%	%
1.02 LPH	PRESIÓN= 5.6065	MCA	se= 30 cm
166	89.07953072	90	0
209	83.48291673	85	0
243	78.14607069	80	0
106	89.68740542	90	1
144	84.25092926	85	1
171	78.81785226	80	1
71	89.79087267	90	2
105	84.32723174	85	2
129	78.81649166	80	2
1.02 LPH	PRESIÓN= 5.6065	MCA	se= 40 cm
200	89.07484758	90	0
252	83.48202513	85	0
293	78.15067493	80	0
117	89.75307814	90	1
163	84.17393886	85	1
194	78.78194176	80	1
74	89.79125568	90	2
112	84.36482546	85	2
139	80.33785122	80	2
1.02 LPH	PRESIÓN= 5.6065	MCA	se= 60 cm
260	89.10029377	90	0
327	83.55736209	85	0
382	78.02085692	80	0
131	89.78333671	90	1
188	84.30746446	85	1
227	78.83701836	80	1
77	89.82023354	90	2
119	84.4666259	85	2
152	78.68323546	80	2

En el cuadro 4.3 se puede apreciar claramente que la longitud máxima de la cinta de goteo es menor con pendiente en contra en comparación con la cinta a nivel, a menor gasto del gotero combinado con un mayor espaciado la longitud tiende a ser mayor.

Los parámetros que influyen más en la UE% son el coeficiente de variación de manufactura (c.v), el exponente x y el gasto del gotero.

En las predicciones del modelo se aprecio una diferencia del 0.95 % en promedio menor que la UE % del catálogo reportada por el fabricante Toro Ag. (s.f.) consultado en (<http://www.toro.com.au/files/AquaTraxx%20%2016mm.pdf>).

Cuadro 4. 4. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catalogo para diferentes pendientes del terreno para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con el gotero de 1.20 lph a espaciados de 40 y 60 cm entre goteros.

CINTA AQUA-TRAXX 16 MM			
LONGITUD	UE CALCULADA	UE CATÁLOGO	PENDIENTE
M	%	%	%
1.20 LPH		PRESIÓN=5.6065 MCA	
se= 40 cm			
173	89.74703546	90	0
218	84.63630209	85	0
254	79.58787801	80	0
109	89.90588564	90	1
148	84.89122225	85	1
176	79.82471865	80	1
72	89.84346046	90	2
106	84.70854568	85	2
131	79.36886764	80	2
1.20 LPH		PRESIÓN=5.6065 MCA	
se= 60 cm			
225	89.77130006	90	0
283	84.6756062	85	0
330	79.6385281	80	0
124	89.90077229	90	1
174	84.80204779	85	1
209	79.69007656	80	1
76	89.79912833	90	2
116	84.53621947	85	2
145	79.18311786	80	2

En el cuadro 4.4 se puede apreciar claramente que la longitud máxima de la cinta de goteo es menor con pendiente en contra en comparación con la cinta a nivel, a menor gasto del gotero combinado con un mayor espaciado la longitud tiende a

ser mayor. Los parámetros que influyen más en la UE% son el coeficiente de variación de manufactura (c.v), el exponente x y el gasto del gotero.

En las predicciones del modelo se apreció una diferencia del 0.31% en promedio menor que la UE % del catálogo reportada por el fabricante Toro Ag. (s.f.) consultado en (<http://www.toro.com.au/files/AquaTraxx%20%2016mm.pdf>).

4.2 Cuadros de comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE% de catálogo para la cinta Aqua-Traxx pbx 16 mm con diferentes características técnicas de operación.

Cuadro 4. 5. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catálogo para la cinta Aqua-Traxx pbx 16 mm a espaciados de 10, 20, 30 y 40 cm con diferentes gastos de los emisores.

AQUA-TRAXX PBX 16 MM					
LONGITUD	UE CALCULADA	UE CATÁLOGO	Q	Se	PENDIENTE
M	%	%	LPH	CM	%
PRESIÓN= 7.14 MCA					
52	91.19350906	90	2.13	10	0
74	89.65155396	90	1.41	10	0
85	89.64484445	90	1.14	10	0
104	89.73701738	90	0.87	40	0
115	89.82946296	90	1.41	20	0
133	89.68535366	90	1.14	20	0
150	89.77653534	90	1.41	30	0
173	89.67978377	90	1.14	30	0
208	89.73701738	90	1.14	40	0
331	89.46743826	90	0.57	40	0

En el cuadro 4.5 se puede apreciar claramente que la longitud máxima de la cinta de goteo es menor cuando el gasto del gotero es mayor y por lo contrario cuando la longitud máxima es mayor el gasto del gotero es menor. También podemos observar que a mayor separación entre emisores, pero teniendo un mismo gasto, mayor es la longitud de la cinta, considerando la cinta a nivel.

Los parámetros que influyen más en la UE% son el coeficiente de variación de manufactura (c.v), el exponente x y el gasto del gotero.

En las predicciones del modelo se apreció una diferencia del 0.40% en promedio menor que la UE % del catálogo reportada por el fabricante Toro Ag. (s.f.) consultado en (<http://www.risiberia.es/resources/archivos/productos/1/aquatraxx.pdf>).

4.3 Cuadros de comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE% de catálogo para la cinta T-Tape Tsx 16 mm con diferentes características técnicas de operación.

Cuadro 4. 6. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catálogo para la cinta T-Tape Tsx 16 mm a diferentes espaciados y gastos de los emisores de la cinta de riego con una presión de operación de 5.61 mca.

T-TAPE TSX 16 MM					
LONGITUD	UE CALCULADA	UE CATÁLOGO	Q	Se	PENDIENTE
M	%	%	LPH	CM	%
PRESIÓN= 5.61 MCA					
199	90.99141614	90	1.3	60	0
155	91.05856164	90	1.9	60	0
199	91.29332663	90	1.9	91	0
128	91.22633596	90	3.8	91	0
220	91.38598977	90	1.9	107	0
142	91.15369698	90	3.8	107	0
242	91.25760933	90	1.9	122	0
155	91.14698974	90	3.8	122	0
254	86.39038816	85	1.3	60	0
198	86.41725932	85	1.9	60	0
254	86.94020625	85	1.9	91	0
162	86.88531752	85	3.8	91	0
280	87.08211966	85	1.9	107	0
182	86.61922593	85	3.8	107	0
308	86.90611499	85	1.9	122	0
198	86.61809757	85	3.8	122	0

En el cuadro 4.6 se puede apreciar claramente que la longitud máxima de la cinta de goteo es menor cuando el gasto es mayor, teniendo la misma separación entre goteros, estableciendo que la cinta de goteo esta a nivel. También se puede observar que a mayor longitud de la cinta es menor la uniformidad y por lo contrario a menor longitud mayor uniformidad de emisión. Los parámetros que influyen más en la UE% son el coeficiente de variación de manufactura (c.v), el exponente x y el gasto del gotero.

En las predicciones del modelo se aprecio una diferencia del 1.46% en promedio mayor que la UE % del catálogo reportada por el fabricante T-Tape TSX (s.f) consultado(http://www.deere.com/en_US/water/homepage/index.html.)

4.4 Cuadros de comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE% de catálogo para la cinta Chapin-drip 16 mm con diferentes características técnicas de operación.

Cuadro 4. 7. Comparación de la UE% calculada con el modelo contra la UE % de catálogo para la cinta chapin-drip 16 mm con diferentes gastos y a espaciados diferentes entre goteros.

CINTA CHAPIN-DRIP 16 MM						
LONGITUD	UE CALCULADA	UE CATÁLOGO	Q	Se	PENDIENTE	
M	%	%	LPH	CM	%	
PRESIÓN=7.14 MCA						
70	89.91915371	90	1.36	10	0	
79	90.49258938	90	0.57	5	0	
85	90.34582232	90	1.01	10	0	
103	90.89648919	90	0.76	10	0	
114	91.75710853	90	1.29	20	0	
136	90.63971077	90	0.74	15	0	
161	89.76565781	90	0.57	15	0	
186	89.70869033	90	0.6	20	0	
224	89.73321909	90	0.34	15	0	
252	90.27034362	90	0.57	30	0	
292	91.29738822	90	0.6	41	0	
457	90.30360092	90	0.8	61	0	

En el cuadro 4.7 se puede apreciar claramente que la longitud máxima de la cinta de goteo es menor cuando el gasto del gotero es mayor y por lo contrario cuando la longitud máxima es mayor el gasto del gotero es menor, considerando la cinta a nivel. También se puede observar que a mayor gasto de los goteros pero a una distancia equivalente la longitud será menor. Los parámetros que influyen más en la UE% son el coeficiente de variación de manufactura (c.v), el exponente x y el gasto del gotero.

En las predicciones del modelo se aprecio una diferencia del 0.58% en promedio mayor que la UE % del catálogo reportada por el fabricante NAANDANJAIN Ltd. (2010) consultado en (www.naandanjain.com.mx/.../25-catalogo-cinta-de-goteo-chapin.htm).

4.5 Graficas de longitudes máximas para las cintas Aqua-Traxx 16 mm, Aqua-Traxx pbx16 mm, T-Tape tsx 16 mm y Chapin-drip 16 mm a diferentes características técnicas de operación.

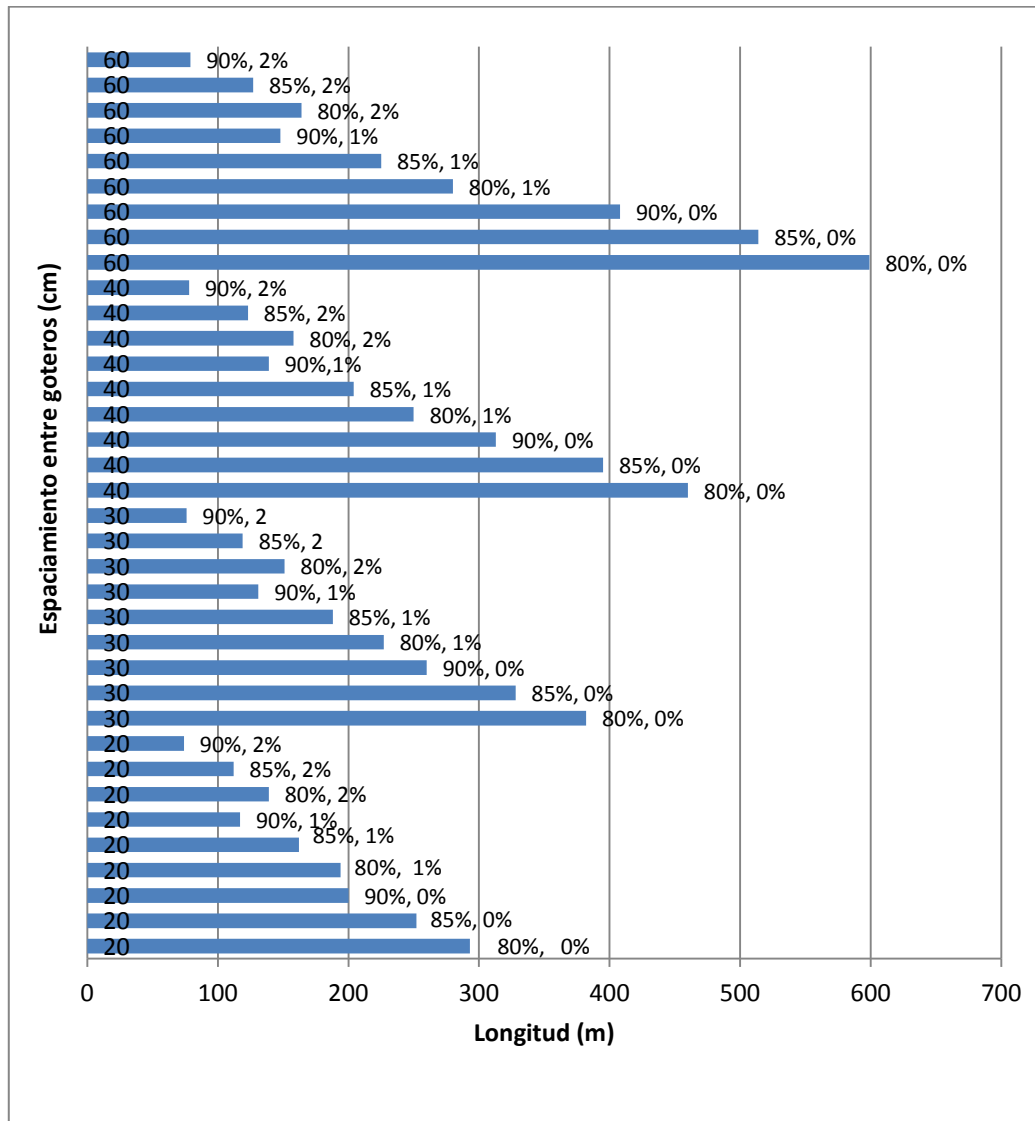


Figura 4. 1. Longitudes máximas a diferentes espaciamentos entre goteros para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con uniformidades de 80%, 85% y 90%, para pendientes 0%, 1% y 2% en contra del flujo utilizando el gotero 0.49 lph.

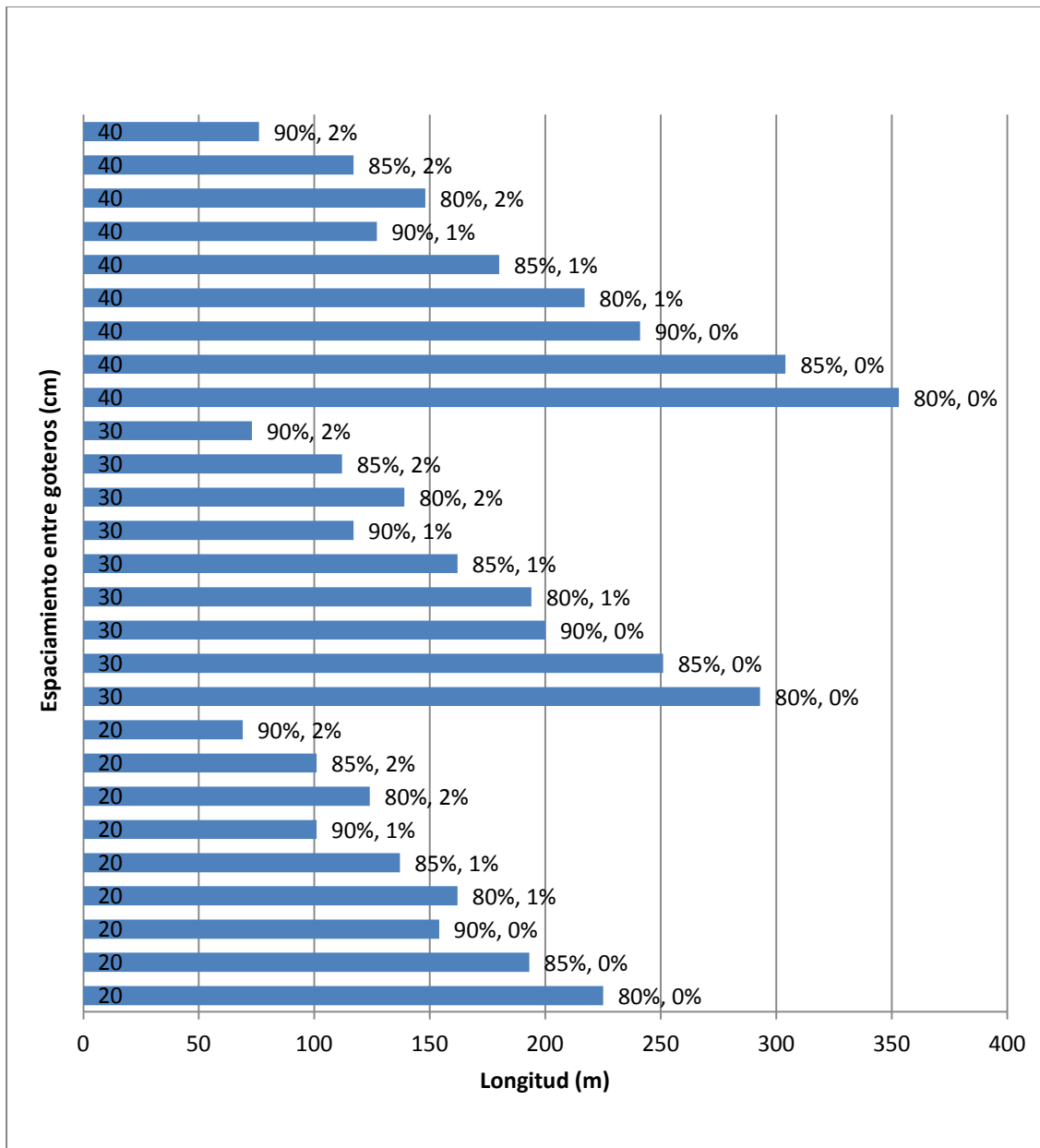


Figura 4. 2. Longitudes máximas a diferentes espaciamientos entre goteros para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con uniformidades de 80%, 85% y 90%, para pendientes 0%, 1% y 2% en contra del flujo utilizando el gotero 0.76 lph.

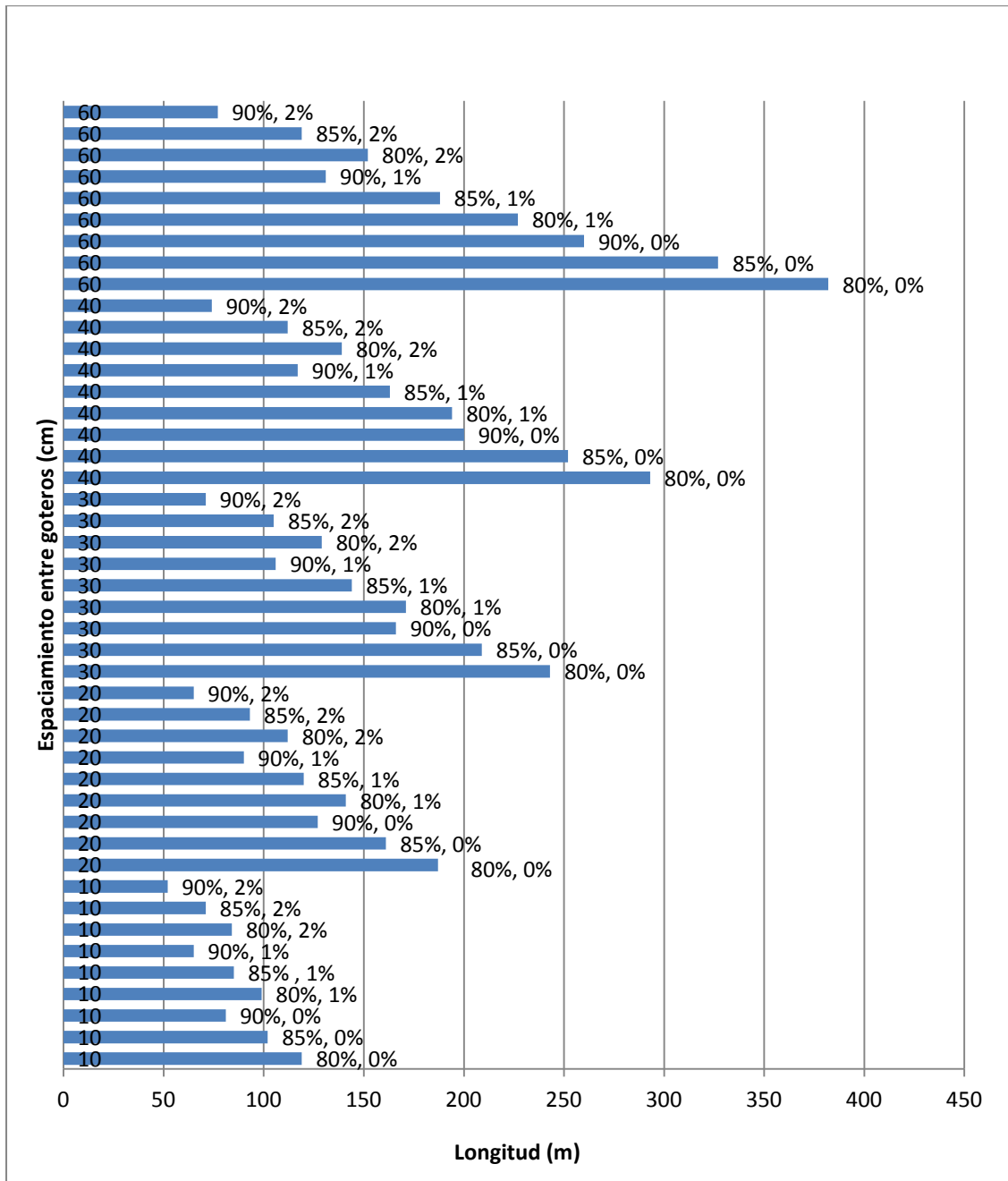


Figura 4. 3. Longitudes máximas a diferentes espaciamientos entre goteros para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con uniformidades de 80%, 85% y 90%, para pendientes 0%, 1% y 2% en contra del flujo utilizando el gotero 1.02 lph.

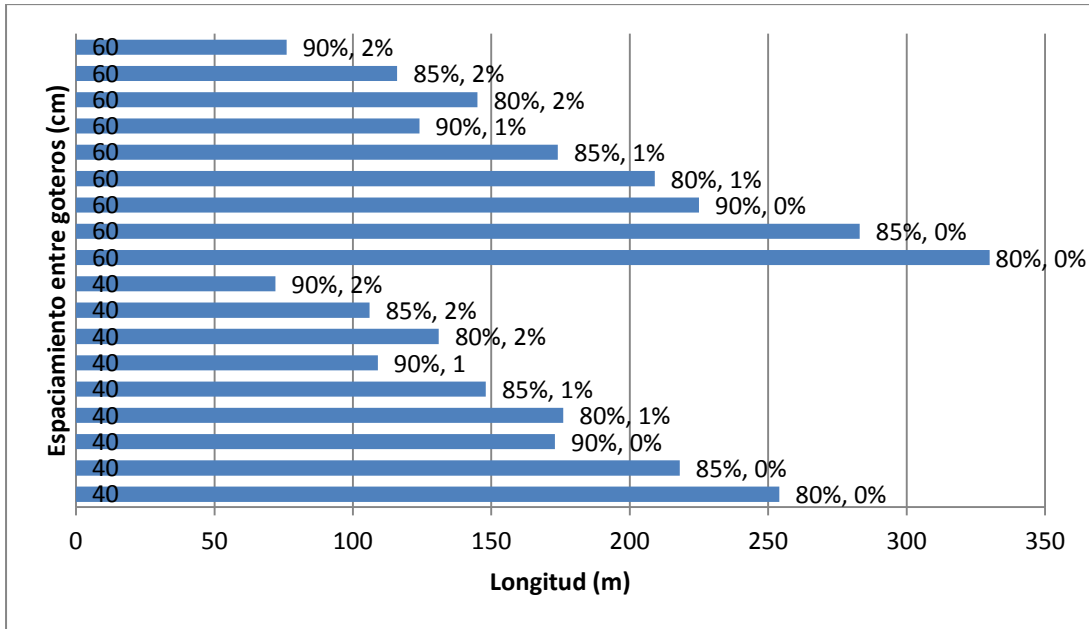


Figura 4. 4. Longitudes máximas a diferentes espaciamientos entre goteros para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con uniformidades de 80%, 85% y 90%, para pendientes 0%, 1% y 2% en contra del flujo utilizando el gotero 1.20 lph.

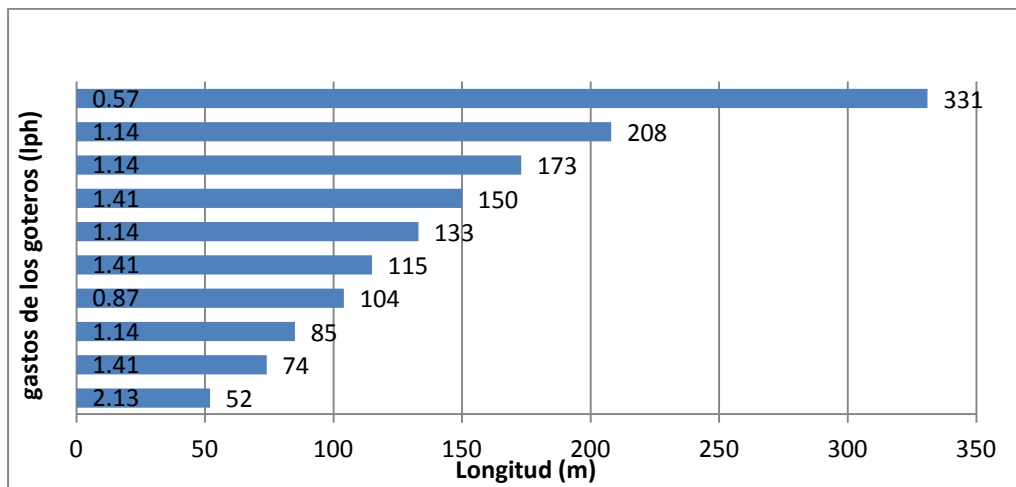


Figura 4. 5. Longitudes máximas para la cinta Aqua-Traxx pbx 16 mm con diferentes gastos a la entrada de la cinta con UE% = 90, pendiente 0%.

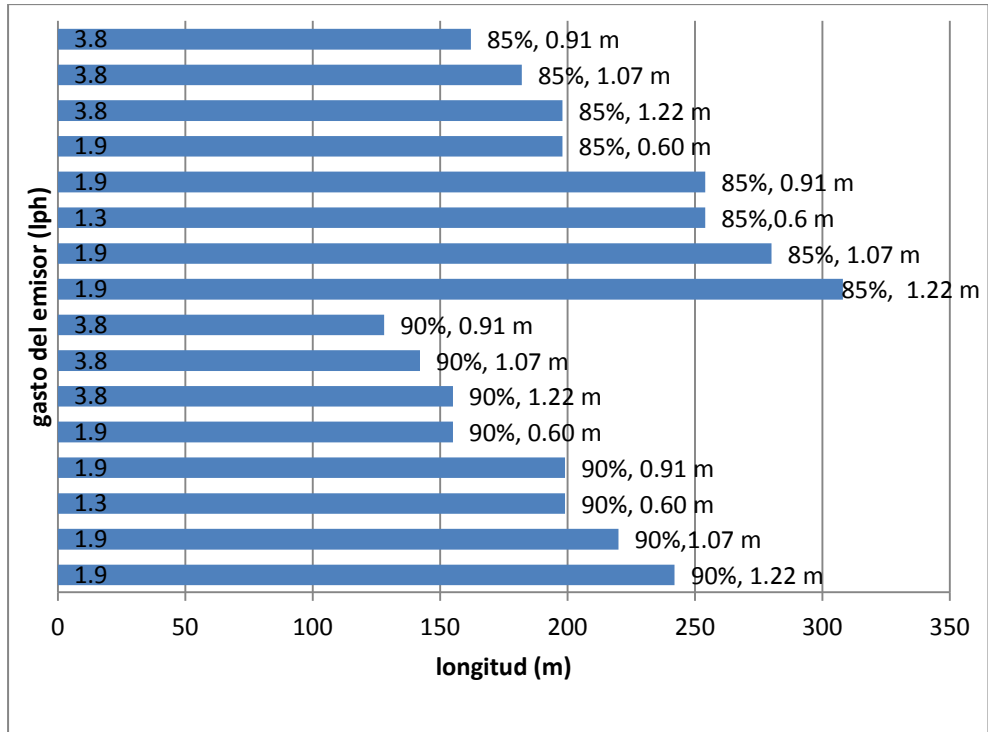


Figura 4. 6. Longitudes máximas a diferentes gastos y espaciamientos entre goteros para la cinta T-Tape Psx 16 mm con uniformidades de 85% y 90%, pendiente 0%.

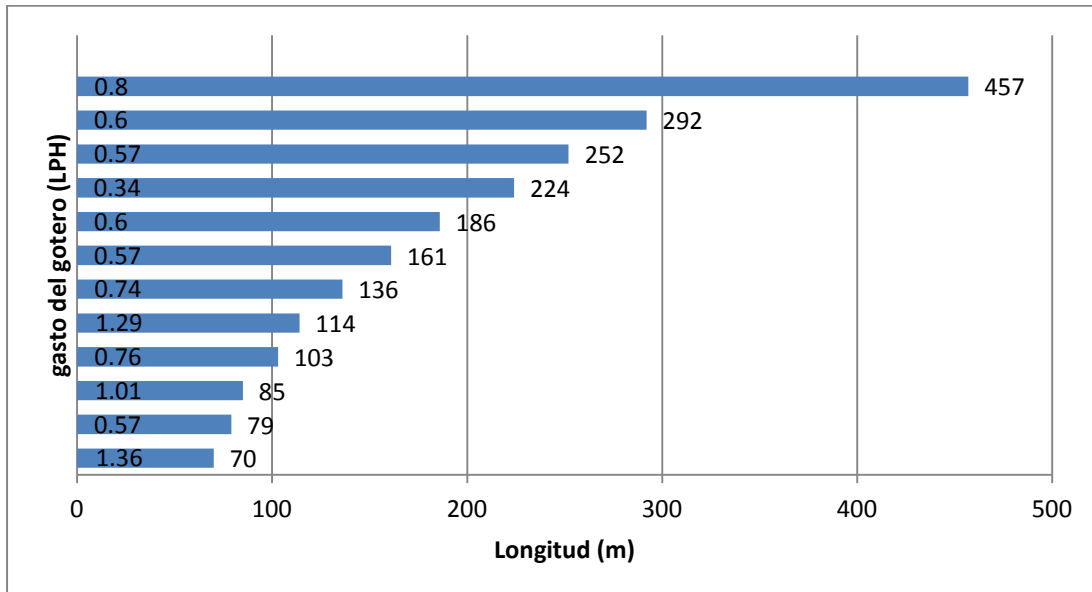


Figura 4. 7. Longitudes máximas para la cinta Chapin-drip 16 mm con diferentes gastos y espaciamientos entre goteros con UE% = 90, pendiente 0%.

4.6 Gradiente hidráulico simulado con el modelo matemático con pendientes a nivel, en contra y a favor del flujo

En siguientes figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se pueden apreciar las tendencias del gradiente hidráulico simulado para una cinta de goteo tendida con pendiente a nivel, en contra y a favor respectivamente, observando que cuando la línea esta a nivel los gastos mínimos están en la cuarta parte más baja al final de la cinta de goteo mientras que en las cintas con pendiente en contra la variación de gastos se debe a una caída de presión ocasionada por la fricción y el desnivel ascendente. En las cintas con pendiente a favor se observa que los gastos mínimos se recorren al interior de la línea y la longitud es más larga en comparación a la longitud de la cinta a nivel para iguales condiciones de diseño (como son: S_e , x , c.v, ID, \emptyset , C, UE).

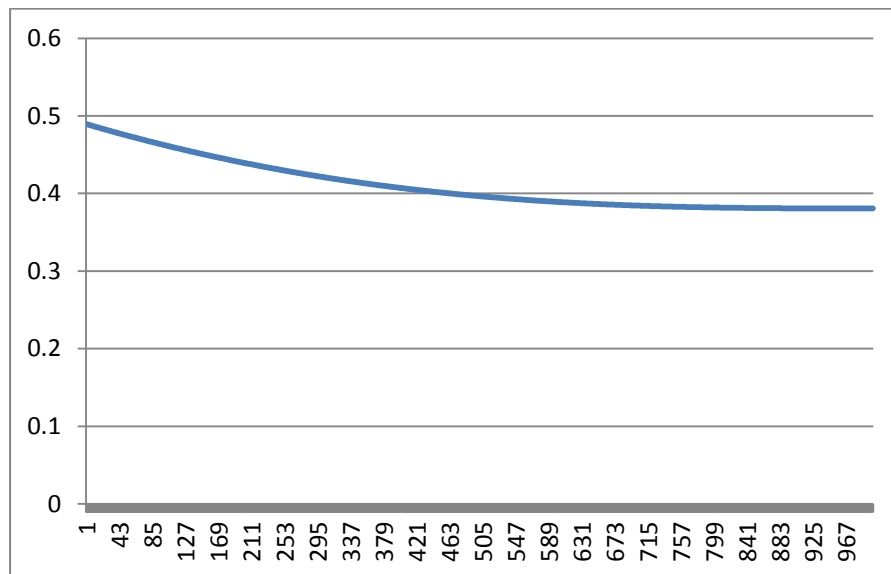


Figura 4. 8 Gradiente hidráulico para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con el gotero 0.49 lph a 5.606 mca a 0% de pendiente con una UE% = 90.

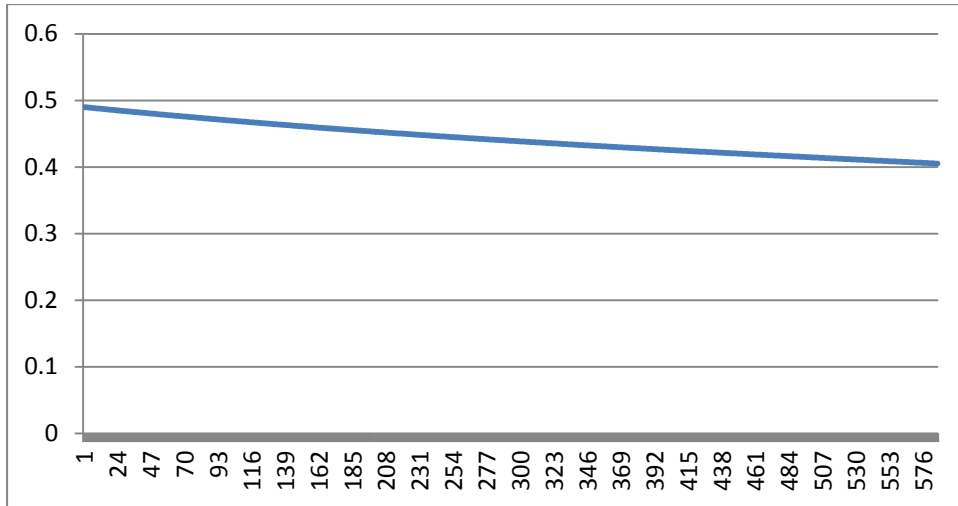


Figura 4. 9. Gradiente hidráulico para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con el gotero 0.49 lph a 5.606 mca a 1% de pendiente en contra con una UE% = 90.

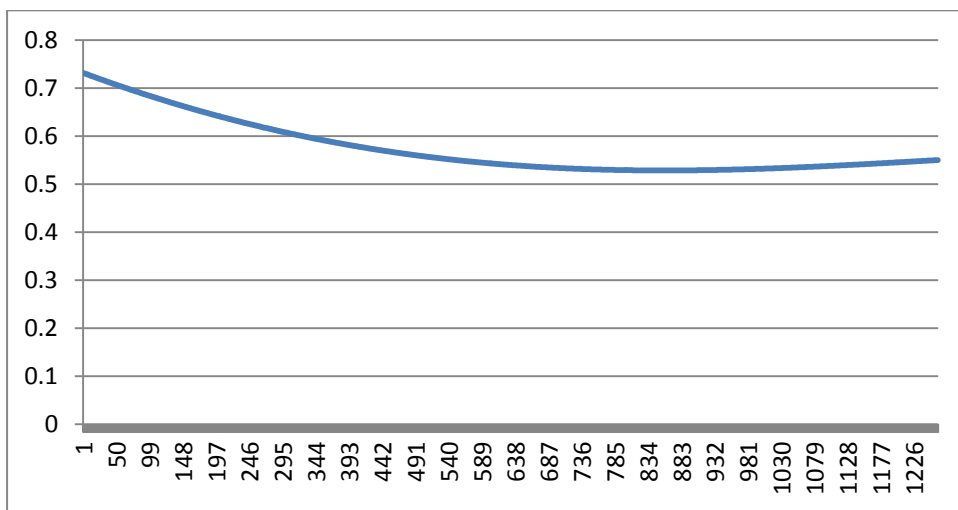


Figura 4. 10. Gradiente hidráulico para la cinta Aqua-Traxx 16 mm con el gotero 0.49 lph a 5.606 mca a 1% de pendiente a favor con una UE% = 90.

Los resultados obtenidos en el análisis de la regresión lineal, son altamente significantes, ya que tenemos un coeficiente de correlación ajustado de 97.3%, esto quiere decir que el modelo es bastante aceptable, para este análisis.

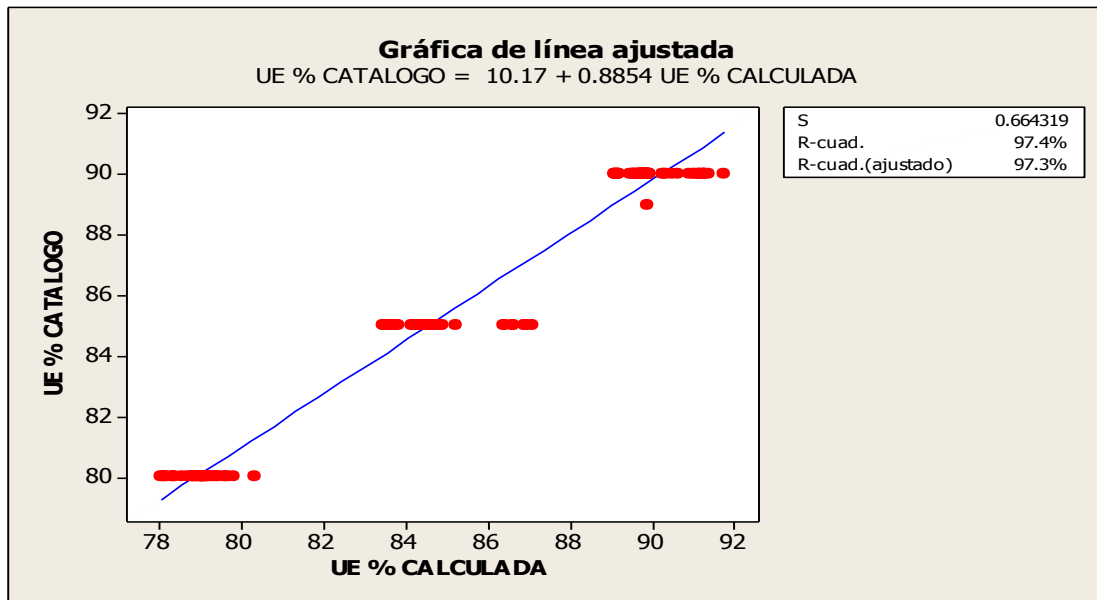


Figura 4. 11. Regresión lineal con el software minitab para validación del modelo y apreciación de la confiabilidad.

La ecuación de regresión es

$$UE \% CATALOGO = 10.17 + 0.8854 UE \% CALCULADA$$

Cuadro 4. 8. Análisis de varianza de la regresión lineal.

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	1	2634.13	2634.13	5968.77	0.000
Error	162	71.49	0.44		
Total	163	2705.63			

GL- grado de libertad, SC- Suma de cuadrados, CM- Cuadrado medio, F- Factor, P-Probabilidad

En la figura 4.11 se puede observar la tendencia de los puntos, cada punto representa la uniformidad de emisión en porcentaje, entre más cerca se encuentren los puntos a la recta mas relación tendrán las dos variable es decir

UE% de catalogo y UE% calculada, estas son muy semejantes y por lo mismo se deduce que la predicción del algoritmo es confiable.

Vemos que, en general, la recta hace un seguimiento bastante bueno de los datos. La formula de la recta que aparece arriba de la gráfica. La pendiente de la recta (β_1) indica que en promedio, a cada incremento de una unidad en el porcentaje de la UE% calculada por el algoritmo matemático (x), le corresponde un incremento de 0.8854 de porcentaje de la UE% de catalogo (Y). El origen de la recta (β_0) sugiere que cuando el algoritmo matemático calcule una uniformidad de emisión del 0 %, el valor de la uniformidad de emisión podría tomar el valor de 10.97 %. Esto obviamente no parece posible. Al examinar las nubes de puntos vemos que las muestras calculadas por el algoritmo matemático se desvían en promedio de 0.76% alrededor de la UE % de catalogo. Pero tal error en la predicción no es significativo.

Cuadro 4. 9. Inferencia estadística.

T –STUDENT	-0.784789364
T-TABLA AL 0.1%	3.320434954

En el cuadro 4.9. Se puede apreciar que la t-student es menor que la t- de tablas por lo tanto como t-student calculada es menor que la t-de tabla entonces se acepta h_0 : UE% calculada= UE% catálogo por lo mismo se deduce que el modelo predice con una elevada precisión.

V. CONCLUSIONES

Al analizar los resultados obtenidos con este algoritmo matemático para simular el gradiente hidráulico de diferentes cintas de goteo tomadas de varias fábricas, se llega a las siguientes conclusiones.

- El algoritmo matemático demostró alta confiabilidad en cuanto a la predicción de la uniformidad de emisión UE%. Ya que se tiene un coeficiente de correlación del 97.3 % al comparar UE% calculada contra UE% catálogo deduciendo que el modelo es altamente predictivo.
- En todas las cintas de goteo estudiadas con el algoritmo matemático se encontró en promedio una diferencia del 0.76% entre UE% calculada contra UE% catálogo, dicha diferencia fueron afectadas por el coeficiente de variación de manufactura (c.v), el exponente x y el gasto del gotero.
- Como se demostró para 164 simulaciones que la t-Student calculada es menor que la t-Student de tablas entonces se acepta H_0 : UE% calculada= UE% catálogo por lo mismo la inferencia estadística indica que el modelo predice con una elevada precisión
- El modelo se puede utilizar para construir el gradiente hidráulico en laterales de riego por goteo telescopeadas y también en laterales tendidas sobre terreno con pendiente topográfica variable.
- En laterales a nivel y con pendiente en contra la cuarta parte de gastos mínimos se localizan en el extremo aguas abajo mientras que en laterales con pendiente a favor la cuarta parte de gastos mínimos se desplaza hacia la parte media de la línea de goteo.

VI. BIBLIOGRAFÍA

A. Losada, L. Juana y J. Martínez, 1995. Caracterización de Riegos por Goteo, Ingeniería del agua, Vol.2, Num.2, Universidad Politécnica de Madrid, Estación Experimental "Las palmerillas", Caja Rural de Almendria. 7-15 pp.

Arellano G., M.A.; J.F. Pinales Q. y F.J. Silva C. 2004. Sistema de riego por cintilla en pequeñas superficies: Estrategia para su instalación a bajo costo. SAGARPA-INIFAP-CIRNE. Campo Experimental Anáhuac, Folleto Técnico Núm. 1, Cd. Anáhuac, N.L., México. 25 p.

Cea Moya María Guillermina, s.f. Evaluación del comportamiento hidráulico de seis modelos de cintas de riego comercializadas en Chile. Ingeniero Agrónomo (CITRA), de la Universidad de Talca.

Cortes Yáñez J. Guadalupe, 1992. Simulación del gradiente hidráulico en laterales de riego por aspersión. Trabajo de tesis. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Facultad de ingeniería, ingeniero agrónomo en irrigación, Saltillo Coahuila México.

Franco Salas Antonio, Pérez Urrestarazu Luis. 2007. Hidráulica y riegos. Universidad de Sevilla. Ingeniería Técnica Agrícola, área de conocimiento ingeniería forestal, departamento; ingeniería Aeroespacial y mecánica de fluidos.

Gil José Alexander, Khan Luis y Hernández Ramiro, 2002. Evaluación del comportamiento hidráulico de varios emisores importados para riego por goteo. Revista UDO Agrícola (2) 1. 71-72 pp.

Gurovich Luis A. 1985, fundamentos y diseños de sistemas de riego, instituto interamericano de cooperación para la agricultura, ejemplar 2, San José, Costa Rica. 397-398 pp.

http://nodocitra.otalca.cl/docs/pdf/riego_por_cintas.pdf).

http://www.infoagro.com/hortalizas/riego_horticolas2.htm)

<http://www.eljardin.ws/riego/sistemas/riego-con-cintilla.html>).

López Rodrigo Jesús, 2010. Riego localizado apuntes de clases, departamento de ingeniería, producción y economía agraria, escuela técnica superior de ingeniería agraria universidad de la laguna Canarias España.

Mahrous A, M. Hanafy, G. A. Bakeer and A. S. Bazaraa, 2008. Computer program for predicting emission uniformity of odd-shaped subunits in drip irrigation system. IRRIGATION AND DRAINAGE Misr J. Ag. Eng., 25(4): 1240-1255.

Muños Rojas Alejandro, 2004. Caracterización Hidráulica de cuatro marcas de emisores para riego localizado comerciales en Chile. Memoria de título. Universidad de Talca, Facultad de agronomía, Ingeniero agrónomo, Talca-Chile.

NAANDANJAIN Ltd. (2010) (www.naandanjain.com.mx/.../25-catalogo-cinta-de-goteo-chapin.htm).

Philipova Nina, 2008. Hydraulic model trickle irrigation laterals. Institute y mechanics, Bulgarian Academy of sciences, Acad G. Bonchev str. Bl.4, Sofía 113, Bulgaria.

Quintanilla Madero Carmen, 1998. NMX-E-225-1998-SCFI requisitos mecánicos y funcionales de cintas de goteo para su instalación y operación en campo especificaciones y métodos de prueba. Directora general de normas, México, D.F, a. 13 p.

Rivera González Miguel, Estrada Avalos Juan, Orona Castillo Ignacio Y Sánchez Cohen Ignacio, 2004. Producción de alfalfa con riego por goteo subsuperficial o subterráneo. INIFAP, CENID – RASPA, Folleto Científico No 13. Gómez Palacio, Durango. 16P.

Rojas, P. L. y Briones S. G. 2001. Diseño y operación de sistemas de riego. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, Buenavista, Saltillo, Coahuila. Primera edición. 112-116pp.

Santos Pereira Luis, de Juan Valero José Arturo, Picornell Buendía María Raquel y Tarjuelo Martín-Benito José M^a, 2010. El Riego y sus Tecnologías, Centro de Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomía, Universidad de Técnica de Lisboa Tapada da Ajuda 1349-017 Lisboa. Portugal. 226-247 pp.

Toro Ag irrigation, AQUA-TRAXX PBX
(<http://www.risiberia.es/resources/archivos/productos/1/aquatraxx.pdf>).

Toro Ag, a business unit of Toro Australia Pty Limited, 53 Howards Road, Beverley, South Australia, 5009. Phone 1300 130 898, Fax (08) 8243 2488. A.B.N. 47 001 310 443. (<http://www.toro.com.au/files/AquaTraxx%20%2016mm.pdf>).

Veliz Tejido Rafael, Mujica Cervantes Albi y Pérez Duarte Wilfredo. 2007 evaluación hidráulica de algunos modelos de goteros comerciales. Revista ciencias técnicas y agropecuarias, vol. 16 núm. 4. Universidad agraria de la Habana.

Villavicencio Abelardo P. Y Villablanca Alexis F. 2010. Determinación del coeficiente de uniformidad de riego. Informativo INIA-RURAL. Región de Arica y Parinocota. Chile.

VII. APENDICE

Ejemplo del modelo matemático realizado en Excel

CARACTERISTICAS DE LA CINTA MARCA: TORO AG			
MODELO	Aqua-Traxx [®]	longitud max (m)	74
qi (lph)	0.49	UE(%)	90
presion (mca)	5.606523955	UE(%) Calculada	89.8692895
Se (m)	0.2	X	0.52
CV %	0.03	k	0.199928803
N. emisores	370	pendiente (%)	2

NUMERO DE EMISOR	GASTO CINTA (LPS)	GASTO EMISOR (LPH)	PERDIDAS DE CARGA EN (MCA)	CARGA DEL EMISOR (MCA)	PENDIENTE
0	0.046178741	0.490289454	0.005225341	5.612894731	0.004
1	0.046042616	0.490052054	0.00521866	5.60766939	0.004
2	0.045906556	0.489814852	0.005211999	5.60245073	0.004
3	0.045770562	0.489577846	0.005205358	5.597238731	0.004
4	0.045634634	0.489341037	0.005198737	5.592033372	0.004
5	0.045498772	0.489104423	0.005192136	5.586834635	0.004
6	0.045362975	0.488868004	0.005185555	5.5816425	0.004
7	0.045227244	0.48863178	0.005178993	5.576456945	0.004
8	0.045091579	0.488395749	0.005172452	5.571277952	0.004
9	0.044955979	0.488159911	0.005165931	5.566105499	0.004
10	0.044820444	0.487924265	0.005159429	5.560939569	0.004
11	0.044684975	0.487688811	0.005152947	5.55578014	0.004
12	0.044549571	0.487453548	0.005146486	5.550627192	0.004
13	0.044414233	0.487218476	0.005140043	5.545480707	0.004
14	0.04427896	0.486983593	0.005133621	5.540340663	0.004
15	0.044143751	0.486748899	0.005127219	5.535207042	0.004
16	0.044008609	0.486514394	0.005120836	5.530079823	0.004
17	0.043873531	0.486280076	0.005114473	5.524958988	0.004
18	0.043738518	0.486045945	0.00510813	5.519844515	0.004
19	0.04360357	0.485812001	0.005101806	5.514736385	0.004
20	0.043468687	0.485578243	0.005095502	5.509634579	0.004
21	0.043333869	0.485344669	0.005089218	5.504539076	0.004
22	0.043199116	0.485111281	0.005082953	5.499449858	0.004
23	0.043064428	0.484878075	0.005076709	5.494366905	0.004
24	0.042929804	0.484645054	0.005070483	5.489290196	0.004
25	0.042795245	0.484412214	0.005064277	5.484219713	0.004
26	0.042660751	0.484179556	0.005058091	5.479155436	0.004
27	0.042526321	0.48394708	0.005051925	5.474097344	0.004
28	0.042391956	0.483714784	0.005045778	5.46904542	0.004
29	0.042257655	0.483482668	0.00503965	5.463999642	0.004
30	0.042123419	0.483250731	0.005033542	5.458959992	0.004
31	0.041989247	0.483018972	0.005027453	5.45392645	0.004
32	0.041855139	0.482787391	0.005021384	5.448898997	0.004
33	0.041721096	0.482555988	0.005015334	5.443877613	0.004
34	0.041587117	0.482324761	0.005009304	5.438862278	0.004
35	0.041453202	0.482093709	0.005003293	5.433852974	0.004
36	0.041319351	0.481862833	0.004997302	5.428849681	0.004
37	0.041185565	0.481632132	0.00499133	5.423852379	0.004
38	0.041051842	0.481401604	0.004985377	5.418861049	0.004
39	0.040918183	0.48117125	0.004979444	5.413875672	0.004
40	0.040784589	0.480941068	0.004973529	5.408896229	0.004
41	0.040651058	0.480711057	0.004967635	5.403922699	0.004
42	0.040517591	0.480481218	0.004961759	5.398955065	0.004
43	0.040384188	0.48025155	0.004955903	5.393993306	0.004
44	0.040250848	0.480022051	0.004950066	5.389037403	0.004
45	0.040117572	0.479792721	0.004944248	5.384087337	0.004
46	0.03998436	0.47956356	0.00493845	5.379143089	0.004
47	0.039851212	0.479334567	0.00493267	5.374204639	0.004

48	0.039718127	0.479105741	0.00492691	5.369271969	0.004
49	0.039585105	0.478877081	0.004921169	5.364345059	0.004
50	0.039452147	0.478648587	0.004915447	5.35942389	0.004
51	0.039319253	0.478420258	0.004909744	5.354508443	0.004
52	0.039186422	0.478192094	0.004904061	5.349598699	0.004
53	0.039053654	0.477964094	0.004898396	5.344694639	0.004
54	0.038920949	0.477736256	0.00489275	5.339796243	0.004
55	0.038788308	0.477508581	0.004887124	5.334903492	0.004
56	0.03865573	0.477281068	0.004881517	5.330016368	0.004
57	0.038523215	0.477053715	0.004875928	5.325134852	0.004
58	0.038390763	0.476826524	0.004870359	5.320258924	0.004
59	0.038258375	0.476599491	0.004864808	5.315388565	0.004
60	0.038126049	0.476372618	0.004859277	5.310523757	0.004
61	0.037993786	0.476145904	0.004853764	5.30566448	0.004
62	0.037861586	0.475919346	0.004848271	5.300810715	0.004
63	0.037729449	0.475692946	0.004842796	5.295962444	0.004
64	0.037597375	0.475466702	0.00483734	5.291119648	0.004
65	0.037465364	0.475240614	0.004831904	5.286282308	0.004
66	0.037333416	0.475014681	0.004826486	5.281450404	0.004
67	0.03720153	0.474788902	0.004821087	5.276623918	0.004
68	0.037069707	0.474563277	0.004815706	5.271802832	0.004
69	0.036937946	0.474337804	0.004810345	5.266987126	0.004
70	0.036806248	0.474112484	0.004805002	5.262176781	0.004
71	0.036674613	0.473887315	0.004799678	5.257371778	0.004
72	0.03654304	0.473662297	0.004794373	5.2525721	0.004
73	0.03641153	0.47343743	0.004789087	5.247777727	0.004
74	0.036280082	0.473212711	0.004783819	5.24298864	0.004
75	0.036148696	0.472988142	0.00477857	5.238204821	0.004
76	0.036017373	0.47276372	0.00477334	5.23342625	0.004
77	0.035886112	0.472539446	0.004768129	5.22865291	0.004
78	0.035754913	0.472315319	0.004762936	5.223884781	0.004
79	0.035623777	0.472091338	0.004757762	5.219121845	0.004
80	0.035492702	0.471867502	0.004752606	5.214364083	0.004
81	0.03536169	0.471643811	0.00474747	5.209611477	0.004
82	0.03523074	0.471420264	0.004742351	5.204864007	0.004
83	0.035099852	0.47119686	0.004737252	5.200121656	0.004
84	0.034969026	0.470973598	0.004732171	5.195384404	0.004
85	0.034838262	0.470750479	0.004727108	5.190652234	0.004
86	0.03470756	0.4705275	0.004722064	5.185925126	0.004
87	0.03457692	0.470304663	0.004717039	5.181203062	0.004
88	0.034446341	0.470081965	0.004712032	5.176486023	0.004
89	0.034315825	0.469859406	0.004707043	5.171773991	0.004
90	0.03418537	0.469636985	0.004702073	5.167066948	0.004
91	0.034054977	0.469414702	0.004697122	5.162364874	0.004
92	0.033924646	0.469192557	0.004692189	5.157667752	0.004
93	0.033794376	0.468970547	0.004687275	5.152975563	0.004
94	0.033664168	0.468748673	0.004682378	5.148288289	0.004
95	0.033534022	0.468526934	0.004677501	5.14360591	0.004
96	0.033403937	0.46830533	0.004672641	5.13892841	0.004
97	0.033273914	0.468083859	0.004667801	5.134255768	0.004
98	0.033143952	0.46786252	0.004662978	5.129587968	0.004
99	0.033014052	0.467641314	0.004658174	5.12492499	0.004
100	0.032884213	0.467420239	0.004653388	5.120266816	0.004
101	0.032754435	0.467199295	0.00464862	5.115613428	0.004
102	0.032624719	0.466978481	0.004643871	5.110964808	0.004
103	0.032495064	0.466757797	0.00463914	5.106320936	0.004
104	0.03236547	0.466537241	0.004634428	5.101681796	0.004
105	0.032235938	0.466316812	0.004629733	5.097047369	0.004
106	0.032106467	0.466096511	0.004625057	5.092417635	0.004
107	0.031977057	0.465876337	0.004620399	5.087792578	0.004
108	0.031847708	0.465656288	0.00461576	5.083172179	0.004
109	0.03171842	0.465436365	0.004611138	5.078556419	0.004
110	0.031589193	0.465216565	0.004606535	5.073945281	0.004

111	0.031460027	0.46499689	0.00460195	5.069338747	0.004
112	0.031330922	0.464777337	0.004597383	5.064736797	0.004
113	0.031201878	0.464557907	0.004592834	5.060139414	0.004
114	0.031072895	0.464338598	0.004588303	5.05554658	0.004
115	0.030943973	0.46411941	0.004583791	5.050958277	0.004
116	0.030815112	0.463900342	0.004579296	5.046374486	0.004
117	0.030686312	0.463681394	0.00457482	5.04179519	0.004
118	0.030557572	0.463462564	0.004570362	5.03722037	0.004
119	0.030428893	0.463243852	0.004565922	5.032650008	0.004
120	0.030300275	0.463025257	0.0045615	5.028084086	0.004
121	0.030171718	0.462806779	0.004557095	5.023522587	0.004
122	0.030043221	0.462588417	0.004552709	5.018965491	0.004
123	0.029914785	0.46237017	0.004548341	5.014412782	0.004
124	0.029786409	0.462152038	0.004543991	5.00986444	0.004
125	0.029658094	0.461934019	0.004539659	5.005320449	0.004
126	0.02952984	0.461716113	0.004535345	5.00078079	0.004
127	0.029401646	0.461498319	0.004531049	4.996245445	0.004
128	0.029273512	0.461280637	0.004526771	4.991714396	0.004
129	0.029145439	0.461063065	0.004522511	4.987187625	0.004
130	0.029017427	0.460845604	0.004518268	4.982665114	0.004
131	0.028889474	0.460628252	0.004514044	4.978146846	0.004
132	0.028761582	0.460411008	0.004509837	4.973632802	0.004
133	0.028633751	0.460193873	0.004505649	4.969122965	0.004
134	0.028505979	0.459976845	0.004501478	4.964617316	0.004
135	0.028378268	0.459759923	0.004497325	4.960115838	0.004
136	0.028250617	0.459543107	0.00449319	4.955618513	0.004
137	0.028123027	0.459326396	0.004489073	4.951125323	0.004
138	0.027995496	0.459109789	0.004484973	4.946636251	0.004
139	0.027868026	0.458893286	0.004480891	4.942151278	0.004
140	0.027740616	0.458676885	0.004476828	4.937670386	0.004
141	0.027613265	0.458460587	0.004472781	4.933193559	0.004
142	0.027485975	0.45824439	0.004468753	4.928720777	0.004
143	0.027358745	0.458028294	0.004464743	4.924252024	0.004
144	0.027231575	0.457812298	0.00446075	4.919787282	0.004
145	0.027104465	0.457596401	0.004456775	4.915326532	0.004
146	0.026977415	0.457380602	0.004452817	4.910869757	0.004
147	0.026850425	0.457164901	0.004448878	4.90641694	0.004
148	0.026723494	0.456949297	0.004444956	4.901968062	0.004
149	0.026596624	0.456733789	0.004441051	4.897523107	0.004
150	0.026469813	0.456518377	0.004437165	4.893082056	0.004
151	0.026343062	0.45630306	0.004433296	4.888644891	0.004
152	0.026216371	0.456087836	0.004429444	4.884211595	0.004
153	0.02608974	0.455872706	0.00442561	4.879782151	0.004
154	0.025963168	0.455657669	0.004421794	4.875356541	0.004
155	0.025836656	0.455442723	0.004417996	4.870934746	0.004
156	0.025710204	0.455227868	0.004414215	4.86651675	0.004
157	0.025583812	0.455013104	0.004410452	4.862102535	0.004
158	0.025457479	0.454798429	0.004406706	4.857692084	0.004
159	0.025331206	0.454583844	0.004402978	4.853285378	0.004
160	0.025204992	0.454369346	0.004399267	4.8488824	0.004
161	0.025078838	0.454154936	0.004395574	4.844483133	0.004
162	0.024952743	0.453940612	0.004391898	4.840087559	0.004
163	0.024826708	0.453726374	0.00438824	4.835695661	0.004
164	0.024700732	0.453512222	0.0043846	4.831307421	0.004
165	0.024574816	0.453298153	0.004380977	4.826922821	0.004
166	0.024448959	0.453084169	0.004377371	4.822541844	0.004
167	0.024323162	0.452870267	0.004373783	4.818164473	0.004
168	0.024197424	0.452656448	0.004370212	4.81379069	0.004
169	0.024071746	0.452442709	0.004366659	4.809420478	0.004
170	0.023946127	0.452229052	0.004363123	4.805053819	0.004

171	0.023820567	0.452015474	0.004359605	4.800690696	0.004
172	0.023695066	0.451801976	0.004356104	4.796331091	0.004
173	0.023569625	0.451588556	0.00435262	4.791974987	0.004
174	0.023444243	0.451375213	0.004349154	4.787622366	0.004
175	0.02331892	0.451161948	0.004345706	4.783273212	0.004
176	0.023193657	0.450948758	0.004342274	4.778927506	0.004
177	0.023068452	0.450735644	0.00433886	4.774585232	0.004
178	0.022943307	0.450522605	0.004335464	4.770246372	0.004
179	0.022818221	0.450309639	0.004332084	4.765910909	0.004
180	0.022693194	0.450096747	0.004328722	4.761578824	0.004
181	0.022568226	0.449883927	0.004325378	4.757250102	0.004
182	0.022443318	0.449671178	0.00432205	4.752924725	0.004
183	0.022318468	0.4494585	0.00431874	4.748602674	0.004
184	0.022193678	0.449245893	0.004315447	4.744283934	0.004
185	0.022068946	0.449033354	0.004312172	4.739968487	0.004
186	0.021944274	0.448820884	0.004308914	4.735656315	0.004
187	0.02181966	0.448608482	0.004305673	4.731347401	0.004
188	0.021695106	0.448396147	0.004302449	4.727041728	0.004
189	0.02157061	0.448183878	0.004299243	4.722739279	0.004
190	0.021446174	0.447971675	0.004296054	4.718440036	0.004
191	0.021321796	0.447759536	0.004292882	4.714143983	0.004
192	0.021197477	0.447547461	0.004289727	4.709851101	0.004
193	0.021073217	0.447335449	0.004286589	4.705561375	0.004
194	0.020949016	0.4471235	0.004283469	4.701274785	0.004
195	0.020824874	0.446911612	0.004280366	4.696991316	0.004
196	0.020700791	0.446699785	0.00427728	4.692710951	0.004
197	0.020576767	0.446488018	0.004274211	4.688433671	0.004
198	0.020452801	0.446276311	0.004271159	4.68415946	0.004
199	0.020328894	0.446064662	0.004268125	4.679888301	0.004
200	0.020205046	0.44585307	0.004265107	4.675620176	0.004
201	0.020081257	0.445641536	0.004262107	4.671355068	0.004
202	0.019957526	0.445430058	0.004259124	4.667092961	0.004
203	0.019833854	0.445218635	0.004256158	4.662833837	0.004
204	0.019710241	0.445007267	0.004253209	4.658577679	0.004
205	0.019586687	0.444795952	0.004250278	4.654324469	0.004
206	0.019463191	0.444584691	0.004247363	4.650074192	0.004
207	0.019339754	0.444373482	0.004244465	4.645826829	0.004
208	0.019216376	0.444162324	0.004241585	4.641582363	0.004
209	0.019093056	0.443951217	0.004238722	4.637340778	0.004
210	0.018969795	0.44374016	0.004235875	4.633102057	0.004
211	0.018846592	0.443529153	0.004233046	4.628866181	0.004
212	0.018723448	0.443318193	0.004230234	4.624633135	0.004
213	0.018600363	0.443107281	0.004227439	4.620402902	0.004
214	0.018477336	0.442896416	0.00422466	4.616175463	0.004
215	0.018354368	0.442685596	0.004221899	4.611950803	0.004
216	0.018231458	0.442474822	0.004219155	4.607728904	0.004
217	0.018108607	0.442264092	0.004216428	4.603509749	0.004
218	0.017985814	0.442053406	0.004213718	4.599293321	0.004
219	0.01786308	0.441842763	0.004211025	4.595079603	0.004
220	0.017740405	0.441632161	0.004208349	4.590868578	0.004
221	0.017617788	0.441421601	0.00420569	4.586660229	0.004
222	0.017495229	0.441211081	0.004203047	4.58245454	0.004
223	0.017372729	0.441000601	0.004200422	4.578251492	0.004
224	0.017250287	0.440790159	0.004197814	4.57405107	0.004
225	0.017127904	0.440579756	0.004195223	4.569853256	0.004
226	0.017005579	0.440369389	0.004192649	4.565658033	0.004
227	0.016883312	0.440159059	0.004190091	4.561465384	0.004
228	0.016761104	0.439948765	0.004187551	4.557275293	0.004
229	0.016638955	0.439738505	0.004185027	4.553087743	0.004
230	0.016516864	0.439528279	0.004182521	4.548902715	0.004

231	0.016394831	0.439318087	0.004180031	4.544720194	0.004
232	0.016272857	0.439107926	0.004177558	4.540540163	0.004
233	0.01615094	0.438897797	0.004175103	4.536362605	0.004
234	0.016029083	0.438687699	0.004172664	4.532187502	0.004
235	0.015907283	0.438477631	0.004170242	4.528014839	0.004
236	0.015785542	0.438267592	0.004167837	4.523844597	0.004
237	0.01566386	0.438057581	0.004165449	4.51967676	0.004
238	0.015542235	0.437847598	0.004163077	4.515511311	0.004
239	0.015420669	0.437637641	0.004160723	4.511348234	0.004
240	0.015299162	0.43742771	0.004158385	4.507187511	0.004
241	0.015177712	0.437217804	0.004156065	4.503029126	0.004
242	0.015056321	0.437007922	0.004153761	4.498873062	0.004
243	0.014934988	0.436798063	0.004151474	4.494719301	0.004
244	0.014813714	0.436588227	0.004149204	4.490567827	0.004
245	0.014692498	0.436378413	0.004146951	4.486418623	0.004
246	0.01457134	0.43616862	0.004144714	4.482271672	0.004
247	0.01445024	0.435958846	0.004142495	4.478126958	0.004
248	0.014329199	0.435749092	0.004140292	4.473984463	0.004
249	0.014208216	0.435539356	0.004138106	4.469844171	0.004
250	0.014087291	0.435329637	0.004135937	4.465706065	0.004
251	0.013966424	0.435119936	0.004133785	4.461570127	0.004
252	0.013845616	0.43491025	0.00413165	4.457436342	0.004
253	0.013724865	0.434700579	0.004129531	4.453304692	0.004
254	0.013604173	0.434490922	0.00412743	4.449175161	0.004
255	0.01348354	0.434281279	0.004125345	4.445047731	0.004
256	0.013362964	0.434071648	0.004123277	4.440922386	0.004
257	0.013242447	0.433862029	0.004121226	4.436799109	0.004
258	0.013121988	0.433652421	0.004119192	4.432677883	0.004
259	0.013001587	0.433442823	0.004117174	4.428558691	0.004
260	0.012881245	0.433233233	0.004115173	4.424441517	0.004
261	0.01276096	0.433023652	0.00411319	4.420326344	0.004
262	0.012640734	0.432814079	0.004111223	4.416213154	0.004
263	0.012520566	0.432604512	0.004109272	4.412101932	0.004
264	0.012400457	0.432394951	0.004107339	4.407992659	0.004
265	0.012280405	0.432185394	0.004105422	4.403885321	0.004
266	0.012160412	0.431975842	0.004103522	4.399779898	0.004
267	0.012040477	0.431766293	0.004101639	4.395676376	0.004
268	0.0119206	0.431556746	0.004099773	4.391574736	0.004
269	0.011800781	0.431347201	0.004097924	4.387474963	0.004
270	0.011681021	0.431137656	0.004096091	4.383377039	0.004
271	0.011561319	0.430928111	0.004094276	4.379280948	0.004
272	0.011441674	0.430718564	0.004092477	4.375186672	0.004
273	0.011322089	0.430509016	0.004090695	4.371094195	0.004
274	0.011202561	0.430299465	0.00408893	4.3670035	0.004
275	0.011083092	0.43008991	0.004087181	4.362914571	0.004
276	0.01096368	0.429880351	0.00408545	4.35882739	0.004
277	0.010844327	0.429670786	0.004083735	4.35474194	0.004
278	0.010725033	0.429461214	0.004082037	4.350658205	0.004
279	0.010605796	0.429251635	0.004080356	4.346576169	0.004
280	0.010486618	0.429042049	0.004078691	4.342495813	0.004
281	0.010367498	0.428832453	0.004077044	4.338417122	0.004
282	0.010248436	0.428622847	0.004075413	4.334340078	0.004
283	0.010129432	0.428413231	0.0040738	4.330264664	0.004
284	0.010010487	0.428203603	0.004072203	4.326190865	0.004
285	0.009891599	0.427993962	0.004070623	4.322118662	0.004
286	0.00977277	0.427784308	0.004069059	4.318048039	0.004
287	0.009654	0.427574639	0.004067513	4.31397898	0.004
288	0.009535287	0.427364956	0.004065984	4.309911467	0.004
289	0.009416633	0.427155256	0.004064471	4.305845483	0.004
290	0.009298037	0.426945539	0.004062975	4.301781012	0.004

291	0.009179499	0.426735805	0.004061497	4.297718037	0.004
292	0.00906102	0.426526051	0.004060035	4.29365654	0.004
293	0.008942599	0.426316278	0.00405859	4.289596505	0.004
294	0.008824236	0.426106484	0.004057162	4.285537916	0.004
295	0.008705931	0.425896669	0.00405575	4.281480754	0.004
296	0.008587685	0.425686831	0.004054356	4.277425004	0.004
297	0.008469497	0.42547697	0.004052979	4.273370647	0.004
298	0.008351367	0.425267085	0.004051618	4.269317669	0.004
299	0.008233295	0.425057174	0.004050275	4.26526605	0.004
300	0.008115282	0.424847238	0.004048949	4.261215775	0.004
301	0.007997327	0.424637274	0.004047639	4.257166826	0.004
302	0.007879431	0.424427283	0.004046347	4.253119187	0.004
303	0.007761593	0.424217262	0.004045071	4.24907284	0.004
304	0.007643813	0.424007212	0.004043813	4.245027769	0.004
305	0.007526092	0.423797131	0.004042571	4.240983956	0.004
306	0.007408429	0.423587019	0.004041347	4.236941385	0.004
307	0.007290824	0.423376874	0.00404014	4.232900038	0.004
308	0.007173278	0.423166695	0.004038949	4.228859899	0.004
309	0.00705579	0.422956482	0.004037776	4.224820949	0.004
310	0.00693836	0.422746234	0.00403662	4.220783173	0.004
311	0.006820989	0.422535949	0.004035481	4.216746553	0.004
312	0.006703676	0.422325627	0.004034359	4.212711072	0.004
313	0.006586422	0.422115267	0.004033254	4.208676713	0.004
314	0.006469226	0.421904868	0.004032167	4.204643459	0.004
315	0.006352089	0.421694428	0.004031097	4.200611292	0.004
316	0.00623501	0.421483948	0.004030043	4.196580195	0.004
317	0.00611799	0.421273425	0.004029007	4.192550152	0.004
318	0.006001028	0.42106286	0.004027989	4.188521145	0.004
319	0.005884124	0.42085225	0.004026987	4.184493156	0.004
320	0.00576728	0.420641596	0.004026003	4.180466168	0.004
321	0.005650493	0.420430895	0.004025037	4.176440165	0.004
322	0.005533765	0.420220148	0.004024087	4.172415128	0.004
323	0.005417096	0.420009353	0.004023155	4.168391041	0.004
324	0.005300485	0.419798509	0.00402224	4.164367886	0.004
325	0.005183933	0.419587615	0.004021343	4.160345646	0.004
326	0.00506744	0.41937667	0.004020463	4.156324303	0.004
327	0.004951005	0.419165674	0.004019601	4.152303839	0.004
328	0.004834629	0.418954625	0.004018756	4.148284238	0.004
329	0.004718311	0.418743521	0.004017929	4.144265482	0.004
330	0.004602052	0.418532364	0.00401712	4.140247552	0.004
331	0.004485852	0.41832115	0.004016328	4.136230433	0.004
332	0.00436971	0.418109879	0.004015554	4.132214105	0.004
333	0.004253627	0.417898551	0.004014797	4.128198551	0.004
334	0.004137603	0.417687164	0.004014058	4.124183754	0.004
335	0.004021637	0.417475717	0.004013337	4.120169696	0.004
336	0.003905731	0.417264209	0.004012634	4.116156359	0.004
337	0.003789883	0.417052639	0.004011949	4.112143725	0.004
338	0.003674094	0.416841006	0.004011282	4.108131776	0.004
339	0.003558363	0.416629309	0.004010632	4.104120494	0.004
340	0.003442692	0.416417548	0.004010001	4.100109862	0.004
341	0.003327079	0.41620572	0.004009388	4.096099861	0.004
342	0.003211525	0.415993824	0.004008793	4.092090473	0.004
343	0.00309603	0.415781861	0.004008216	4.08808168	0.004
344	0.002980594	0.415569828	0.004007658	4.084073464	0.004
345	0.002865217	0.415357725	0.004007118	4.080065806	0.004
346	0.002749899	0.415145551	0.004006597	4.076058688	0.004
347	0.00263464	0.414933304	0.004006094	4.072052091	0.004
348	0.002519439	0.414720984	0.00400561	4.068045997	0.004
349	0.002404298	0.414508588	0.004005144	4.064040388	0.004
350	0.002289216	0.414296117	0.004004697	4.060035244	0.004

351	0.002174192	0.414083569	0.00400427	4.056030546	0.004
352	0.002059228	0.413870943	0.004003861	4.052026277	0.004
353	0.001944323	0.413658238	0.004003471	4.048022416	0.004
354	0.001829477	0.413445453	0.004003101	4.044018944	0.004
355	0.00171469	0.413232586	0.004002751	4.040015843	0.004
356	0.001599963	0.413019636	0.004002419	4.036013092	0.004
357	0.001485294	0.412806603	0.004002108	4.032010673	0.004
358	0.001370685	0.412593485	0.004001817	4.028008565	0.004
359	0.001256135	0.41238028	0.004001546	4.024006748	0.004
360	0.001141644	0.412166989	0.004001295	4.020005202	0.004
361	0.001027213	0.411953608	0.004001065	4.016003907	0.004
362	0.00091284	0.411740138	0.004000856	4.012002842	0.004
363	0.000798527	0.411526577	0.004000668	4.008001987	0.004
364	0.000684274	0.411312924	0.004000502	4.004001319	0.004
365	0.00057008	0.411099177	0.004000358	4.000000817	0.004
366	0.000455945	0.410885335	0.004000237	3.996000459	0.004
367	0.000341869	0.410671396	0.004000139	3.992000222	0.004
368	0.000227853	0.41045736	0.004000065	3.988000084	0.004
369	0.000113897	0.410243225	0.004000018	3.984000018	0.004
370	0	0.410028989	0	3.98	0.004

promedio General	0.449417138
promedio Minimo	0.419885631
UE	89.8692895