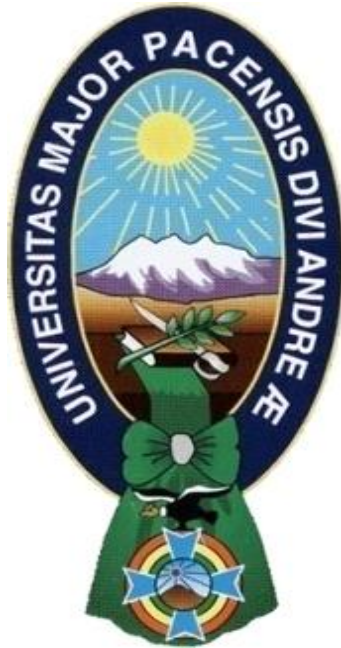


**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES**  
**FACULTAD DE AGRONOMIA**  
**CARRERA DE INGENIERIA AGRONOMICA**



**TESIS DE GRADO**

**ELABORACION DE UN PROGRAMA INFORMATICO DE APLICACIÓN  
PARA DISEÑO AGRONOMICO E HIDRAULICO EN EL METODO DE  
RIEGO POR GOTEO**

**CAPARICONA MARCA JUAN JOSE**

**LA PAZ – BOLIVIA**

**2020**

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES**  
**FACULTAD DE AGRONOMIA**  
**CARRERA DE INGENIERIA AGRONOMICA**

**ELABORACION DE UN PROGRAMA INFORMATICO DE APLICACIÓN PARA  
DISEÑO AGRONOMICO E HIDRAULICO EN EL METODO DE RIEGO POR GOTEO**

Tesis de grado presentado como  
requisito parcial para optar por el título de  
Ingeniero Agrónomo.

**CAPARICONA MARCA JUAN JOSE**

**Asesores:**

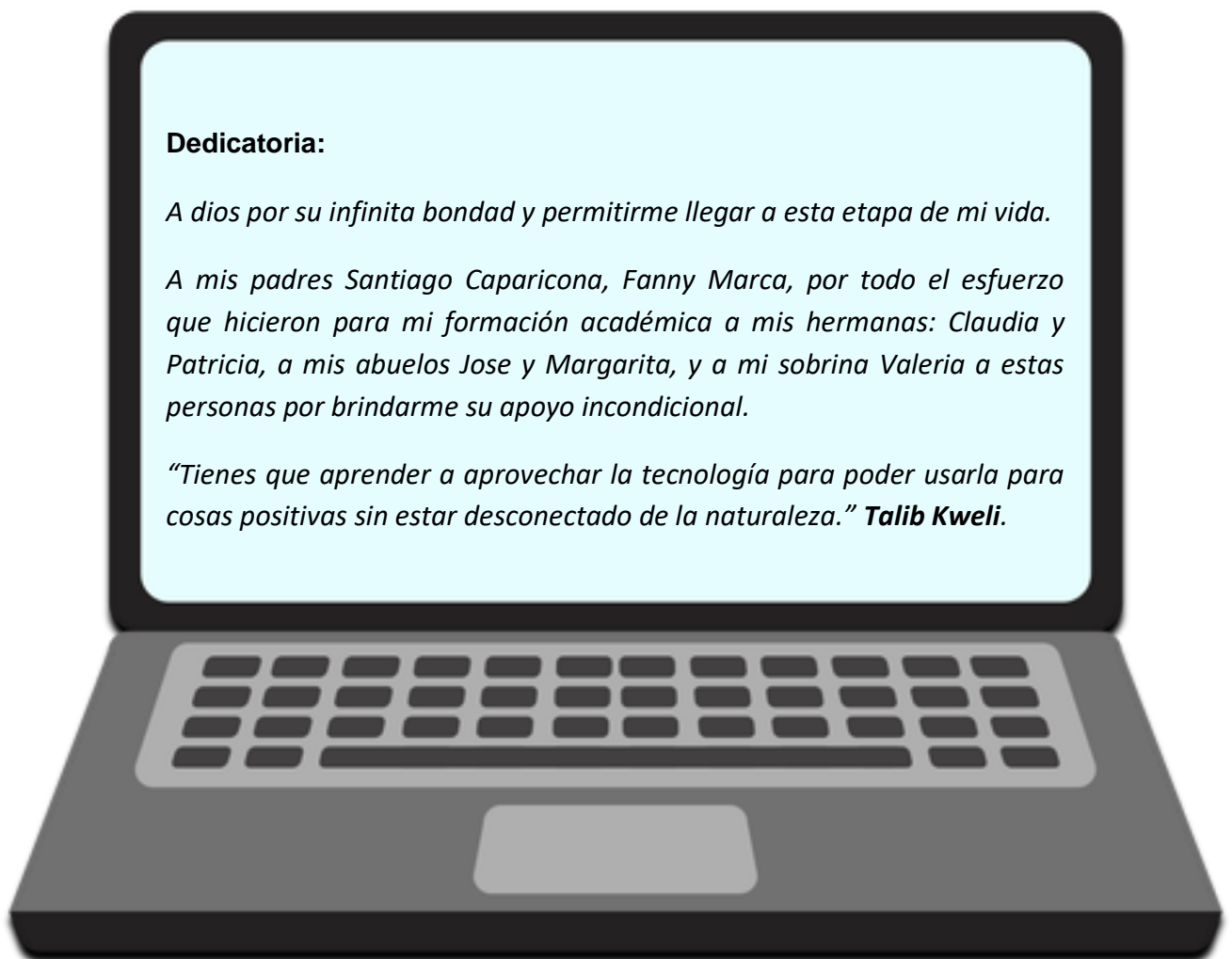
Ing. Ph. D. Chipana Rivera René .....  
Ing. M. Sc. Serrano Coronel Genaro .....

**Comité Revisor:**

Ing. M. Sc. Arragan Tancara Fanny .....  
Ing. M. Sc. Flores Mancilla Wily Marco .....  
Ing. M. Sc. López Blanco Carlos .....

**Aprobada**

Presidente Tribunal Examinador .....



**Dedicatoria:**

*A dios por su infinita bondad y permitirme llegar a esta etapa de mi vida.*

*A mis padres Santiago Caparicona, Fanny Marca, por todo el esfuerzo que hicieron para mi formación académica a mis hermanas: Claudia y Patricia, a mis abuelos Jose y Margarita, y a mi sobrina Valeria a estas personas por brindarme su apoyo incondicional.*

*“Tienes que aprender a aprovechar la tecnología para poder usarla para cosas positivas sin estar desconectado de la naturaleza.” **Talib Kweli.***

## **Agradecimientos**

Al finalizar el presente trabajo de tesis deseo agradecer a las siguientes personas e instituciones:

A la Universidad Mayor de San Andrés, en especial a la Facultad de Agronomía, Carrera de Ingeniería Agronómica por los años de enseñanza impartida en sus aulas.

A mis asesores Ing. Ph. D. Chipana Rivera Rene y Ing. M. Sc. Serrano Coronel Genaro por su orientación en el desarrollo de esta tesis.

Al plantel docente por compartir sus experiencias profesionales dentro de las aulas, a todos mis compañeros, amigos que estuvieron a mi lado con las mismas metas propuestas en el transcurso de nuestra carrera profesional.

A la materia de Métodos y Sistemas de Riego, el cual fue dictada por el Ing. M. Sc. Serrano G. y a la cual tuve suerte de asistir, materia por el cual empezó mi fascinación a la programación y a la informática, el cual me llevo a realizar este trabajo.

A los Ingenieros Fanny Arragan, Willy Flores y Carlos López, miembros del tribunal revisor, por los aportes que me dieron en el desarrollo de la tesis.

A mis amigos Mariana Avendaño, Oliver Ajoururo, Marcelo Paredes amigos especiales que conocí en esta casa de estudios y a los cuales estoy agradecido por su compañerismo.

**¡Muchas Gracias!**

## Índice de contenido

Dedicatoria: .....	i
Agradecimientos .....	ii
Índice de contenido.....	iii
Índice de cuadros.....	vi
Índice de figuras.....	vii
Índice de anexos.....	viii
Resumen.....	ix
Summary.....	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	2
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo general .....	4
2.2. Objetivos específicos .....	4
2.3. Hipótesis .....	4
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	5
3.1. Descripción del riego por goteo .....	5
3.2. Componentes del riego por goteo.....	7
3.2.1. Fuente de energía .....	7
3.2.2. Cabezal de control .....	8
3.2.3. Red de tuberías .....	8
3.2.4. Goteros o emisores .....	8
3.2.4.1. Por su instalación en la tubería.....	9
3.2.4.2. Por su comportamiento hidráulico .....	9
3.2.5. Dispositivos de control .....	11
3.3. Calidad de agua disponible para el riego .....	11
3.3.1. Sales totales .....	11
3.3.1.1. Evaluación de la salinidad.....	12
3.3.1.2. Tratamiento de los problemas de salinidad .....	13
3.3.1.3. Cultivos tolerantes a la salinidad .....	14
3.3.2. Concentración absoluta de iones.....	16

3.3.3. Concentración relativa de iones.....	16
3.3.3.1. Sodificación .....	17
3.4. Diseño de sistema de riego por goteo .....	18
3.4.1. Diseño agronómico .....	18
3.4.1.1. Eficiencia de aplicación.....	19
3.4.1.2. Factor de cobertura.....	20
3.4.1.3. Determinación de intervalo de riego y tiempo de riego .....	21
3.4.2. Diseño hidráulico.....	21
3.4.2.1. Pérdida de carga.....	22
3.4.2.2. Factor de ajuste en tuberías de salida múltiple .....	24
3.5. Elaboración de un programa.....	25
3.5.1. Definición y análisis del problema.....	26
3.5.2. Creación del algoritmo .....	26
3.5.3. Representación del algoritmo .....	26
3.5.3.1. Diagrama de flujo .....	26
3.5.4. Prueba de escritorio .....	27
3.5.5. Codificación, compilación, depuración y ejecución .....	28
3.5.5.1. Codificación .....	28
3.5.5.2. Compilación.....	28
3.5.5.3. Depuración .....	28
3.5.5.4. Ejecución .....	28
3.5.6. Documentación.....	28
3.5.6.1. Documentación interna .....	29
3.5.6.2. Documentación externa .....	29
3.5.7. Mantenimiento .....	29
3.6. Visual Studio software de desarrollo.....	29
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
4.1. Localización.....	32
4.2. Características ecológicas .....	32
4.3. Materiales .....	32
4.3.1. Material de escritorio .....	32
4.3.2. Material de campo.....	33

4.4. Métodos .....	33
4.4.1. Diseño agronómico .....	34
4.4.2. Diseño hidráulico .....	35
4.4.2.1. Lateral horizontal .....	35
4.4.2.2. Lateral ascendente .....	35
4.4.2.3. Lateral descendente .....	36
4.4.2.4. Viscosidad cinemática del agua .....	37
4.4.3. Diseño del programa .....	40
4.4.3.1. Representación conceptual del programa .....	40
4.5. Lista de símbolos diseño agronómico .....	45
4.6. Lista de símbolos diseño hidráulico .....	46
4.6.1. Evaluación de riego por goteo .....	80
4.6.1.1. Uniformidad de distribución .....	81
4.6.1.2. Uniformidad de emisión .....	82
4.6.1.3. Manejo del sistema de riego .....	82
4.6.1.4. Diagramas de manejo .....	82
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	84
5.1. Programa Agrologic .....	86
5.2. Validación del programa .....	91
5.3. Evaluación de un sistema de riego por goteo .....	94
6. CONCLUSIONES .....	97
7. RECOMENDACIONES .....	99
8. BIBLIOGRAFÍA .....	100
ANEXOS .....	103

## Índice de cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Iones mas comunes en el agua para riego y pesos equivalentes. ....	12
<b>Cuadro 2.</b> Riesgo de salinidad de acuerdo con los valores de C y CE (FAO).....	13
<b>Cuadro 3.</b> Tolerancia de los cultivos a distintos niveles de salinidad de agua de riego ( $CE_r$ ) y del extracto de saturación del suelo ( $CE_{es}$ ). ....	15
<b>Cuadro 4.</b> Eficiencia de aplicación relacionada a clima, profundidad y textura. ....	20
<b>Cuadro 5.</b> Valores del factor C de la ecuación de Hazen Williams. ....	24
<b>Cuadro 6.</b> Velocidad máxima en función del diámetro interno. ....	40
<b>Cuadro 7.</b> Propiedades hidrofísicas del suelo.....	41
<b>Cuadro 8.</b> Goteros desarmables de tipo botón. ....	41
<b>Cuadro 9.</b> Calificación de la instalación, método de Merríam y Keller. ....	82
<b>Cuadro 10.</b> Diseño agronómico procedimiento con sales y sin sales. ....	84
<b>Cuadro 11.</b> Datos Sistema de riego por goteo.....	85
<b>Cuadro 12.</b> Diseño del lateral comparación de la viscosidad ( $\mu$ ) y el factor de fricción ( $f$ ). ....	85
<b>Cuadro 13.</b> Diseño de la terciaria comparación de la viscosidad ( $\mu$ ) y el factor de fricción ( $f$ ). ..	86
<b>Cuadro 14.</b> Diseño de la principal comparación de la viscosidad ( $\mu$ ) y el factor de fricción ( $f$ ). .	86
<b>Cuadro 15.</b> Comparación del diseño agronómico con otros autores; lámina bruta, frecuencia de riego, tiempo de riego y caudal necesario. ....	92
<b>Cuadro 16.</b> Diseño de laterales. ....	93
<b>Cuadro 17.</b> Diseño de terciarias.....	93
<b>Cuadro 18.</b> Diseño de la principal. ....	93
<b>Cuadro 19.</b> Potencia de la bomba.....	93
<b>Cuadro 20.</b> Volumen obtenido por los emisores en (ml). ....	94
<b>Cuadro 21.</b> Resultados de la evaluación del sistema de riego por goteo. ....	94
<b>Cuadro 22.</b> Resultado de volumen emitido por emisor, fracción del suelo ( $f$ ), lamina requerida ( $V_r$ ), Rendimiento de aplicación (AE) y Coeficiente de descarga (Cd). ....	95



## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Relación caudal-presión de un emisor. ....	10
<b>Figura 2.</b> Figuras geométricas usadas en los diagramas de flujo. ....	27
<b>Figura 3.</b> Plano de ubicación. ....	31
<b>Figura 4.</b> Lateral horizontal. ....	35
<b>Figura 5.</b> Lateral ascendente. ....	36
<b>Figura 6.</b> Lateral descendente. ....	36
<b>Figura 7.</b> Esquema del programa. ....	48
<b>Figura 8.</b> Diseño agronómico. ....	49
<b>Figura 9.</b> Diseño hidráulico. ....	60
<b>Figura 10.</b> Diseño de laterales. ....	61
<b>Figura 11.</b> Diseño de terciarias. ....	68
<b>Figura 12.</b> Diseño de la principal. ....	76
<b>Figura 13.</b> Potencia de la bomba. ....	79
<b>Figura 14.</b> Procedimiento para la evaluación del riego por goteo. ....	81
<b>Figura 15.</b> Diseño agronómico llenado de datos. ....	87
<b>Figura 16.</b> Diseño agronómico resultados. ....	87
<b>Figura 17.</b> Diseño hidráulico Blasius (formula general). ....	88
<b>Figura 18.</b> Diseño hidráulico Darcy Weisbach. ....	89
<b>Figura 19.</b> Diseño hidráulico Hazen Williams. ....	91
<b>Figura 20.</b> Croquis de los emisores evaluados. ....	94
<b>Figura 21.</b> Ajuste de la distribución normal a los datos de campo. ....	96
<b>Figura 22.</b> Diagrama de manejo del riego para una función de distribución normal. ....	96

## Índice de anexos

<b>ANEXO 1.</b> Acerca del programa.....	104
<b>ANEXO 2.</b> Selección del diseño. ....	104
<b>ANEXO 3.</b> Selección de la tabla del suelo.....	105
<b>ANEXO 4.</b> Tabla de profundidad radicular y factor de agotamiento (suelo).....	105
<b>ANEXO 5.</b> Propiedades hidrofísicas (suelo).....	105
<b>ANEXO 6.</b> Selección de la tabla cultivo.....	106
<b>ANEXO 7.</b> Cultivos de forraje. ....	106
<b>ANEXO 8.</b> Cultivos hortícolas. ....	106
<b>ANEXO 9.</b> Cultivos frutales.....	107
<b>ANEXO 10.</b> Cultivos extensivos.....	107

## Resumen

El siguiente trabajo de tesis, tuvo como objetivo del desarrollar un programa informático de aplicación para diseño agronómico e hidráulico en el método de riego por goteo, el cual se programó en el software de desarrollo de Visual Studio.

Para la elaboración del programa Agrológic se realizó los diagramas de flujo en Visio donde se representa de forma gráfica todo el procedimiento del diseño agronómico e hidráulico, para esto se siguió la metodología propuesta por Serrano G. (2018). Donde se considera la eficiencia de aplicación (Keller), en función al clima, textura del suelo y profundidad radicular y el requerimiento de lavado de sales en el procedimiento del diseño agronómico. El cálculo de la viscosidad cinemática del agua con la ecuación de Pouseuille y el método de Newthon Raphson para el cálculo del factor de fricción (f) en la ecuación de Colebrook White y el diámetro teórico en el diseño de laterales, terciarias y principal, en el procedimiento del diseño hidráulico.

Los datos necesarios para el procedimiento del diseño agronómico e hidráulico fueron tomados de tesis de grado que fueron realizados en la estación experimental de Cota cota y de la medición de un sistema de riego por goteo instalado, Para la comparación de la metodología de lavado de sales y sin lavado de sales en el diseño agronómico, el caudal calculado para ambos métodos es de 3,52 m<sup>3</sup>/hr, el agua de riego tiene una conductividad eléctrica de 0,03009 dS/m, estos resultados se asemejan por la baja concentración de sales.

En el procedimiento del diseño hidráulico la viscosidad cinemática conseguida con la ecuación de Pouseuille, y tablas a una temperatura de 20 °C es de 1,02 E<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, y la comparación de la ecuación de Colebrook White y Swamee Jain para el del factor de fricción (f), obtuvieron los mismos resultados en el procedimiento del diseño de laterales, terciarias y principal donde no hubo mucha variación en los resultados.

Se realizo una prueba de escritorio para seguir los resultados obtenidos con el programa Agrológic y así poder verificar los resultados obtenidos con el programa, los resultados fueron comprobados con la Classpad II, se realizó una comparación con los métodos de Chow, Agronayade, Veintimilla comparando los resultados obtenidos con

Agrológic en el procedimiento del diseño agronómico donde se obtuvo un coeficiente de variación obtenido es de 3,19 %.

En el diseño hidráulico se consideraron las ecuaciones de Blasius, Darcy Weisbach y Hazen Williams para el cálculo de la pérdida de carga, se realizó una comparación entre el uso de estas ecuaciones, en la ecuación de Hazen Williams no se añadió variables para su procedimiento, el coeficiente de variación obtenida en el diseño de laterales, terciarias y principal es de 0,18 %.

Para la evaluación del sistema de riego por goteo de la estación experimental de Cota Cota se siguió la metodología de Karmelli y Keller, en un invernadero de la estación Experimental de la Facultad de Agronomía, obteniendo un resultado de uniformidad de emisión de (UE) de 74,6 % y un coeficiente de uniformidad (CU) de 88,45 %.

## Summary

The following thesis work was aimed at developing an application software program for agronomic and hydraulic design in the drip irrigation method, which was programmed in the Visual Studio development software.

For the preparation of the Agrologíc program, the flow diagrams were carried out in Visio where the entire agronomic and hydraulic design procedure is represented graphically, for this the methodology proposed by Serrano G. (2018) was followed. Where the application efficiency (Keller) is considered, depending on the climate, soil texture and root depth and the requirement of salt washing in the agronomic design procedure. The calculation of the kinematic viscosity of the water with the Pouseuille equation and the Newthon Raphson method for the calculation of the friction factor (f) in the Colebrook White equation and the theoretical diameter in the design of lateral, tertiary and main, in The hydraulic design procedure.

The necessary data for the procedure of the agronomic and hydraulic design were taken from thesis of grade that were realized in the experimental station of Cota cota and of the measurement of a drip irrigation system installed, For the comparison of the methodology of salt washing and without salt washing in the agronomic design, the calculated flow rate for both methods is 3.52 m<sup>3</sup> / hr, the irrigation water has an electrical conductivity of 0.03009 dS / m, these results are similarized by the low concentration of salts.

In the hydraulic design procedure the kinematic viscosity achieved with the Pouseuille equation, and tables at a temperature of 20 ° C is 1.02 E-6´m<sup>2</sup> / s, and the comparison of the Colebrook White and Swamee Jain equation for the friction factor (f), they obtained the same results in the lateral, tertiary and main design procedure where there was not much variation in the results.

A desktop test was carried out to follow the results obtained with the Agrologíc program and thus be able to verify the results obtained with the program, the results were verified with the Classpad II, a comparison was made with the methods of Chow, Agronayade,

Twenty-one comparing the Results obtained with Agrologíc in the agronomic design procedure where a coefficient of variation obtained was 3.19%.

In the hydraulic design the equations of Blasius, Darcy Weisbach and Hazen Williams were considered for the calculation of the loss of load, a comparison was made between the use of these equations, in the Hazen Williams equation no variables were added for its procedure, the coefficient of variation obtained in the lateral, tertiary and main design is 0.18%.

For the evaluation of the drip irrigation system of the experimental Cota Cota station, the methodology of Karmelli and Keller was followed, in a greenhouse of the Experimental station of the Faculty of Agronomy, obtaining a result of emission uniformity of (EU) of 74.6% and a uniformity coefficient (CU) of 88.45%.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los distintos tipos de software existentes en el ámbito de riego son provenientes de otros países, el idioma de origen, sistema de unidades no muy usadas en nuestro país, los altos costos al comprar una licencia para el uso de estos y su complejidad de uso, son algunas desventajas que tienen los programas existentes para el diseño del riego por goteo.

Un software de aplicación para los cálculos de riego por goteo permite obtener resultados confiables y con la menor cantidad de errores que se dejan pasar por algunos detalles cuando el procedimiento del diseño agronómico e hidráulico es realizado manualmente, el uso de un programa tiene como ventaja el poder realizar los cálculos en el menor tiempo posible lo que facilita la toma de decisiones más convenientes para el sistema de riego por goteo.

La elaboración de un programa informático permite considerar algunas de las investigaciones que se realizaron en el ámbito del riego que no son tomadas en cuenta en los programas de riego existentes, considerando el requerimiento de lavado de sales en el procedimiento del diseño agronómico, la viscosidad cinemática del agua ( $\nu$ ), según la fórmula de Pouseille a diferentes temperaturas y la consideración de la pendiente del terreno para la nueva variación de carga permitida ( $\Delta H_a$ ) en el diseño hidráulico. Con todas estas consideraciones se obtendrá un programa que servirá de herramienta al ingeniero agrónomo para el desarrollo de sus proyectos de riego.

El avance de la tecnología ha permitido facilitar las tareas del hombre usando como herramienta el computador, el software como parte de este permite optimizar, automatizar la información y realizando cálculos en el menor tiempo posible, la programación ha permitido todo esto siguiendo una secuencia de pasos y sentencias para permitir obtener una solución a un problema en específico.

La empresa Microsoft desarrolladora de software contribuyo mucho con el cambio de la informática jugando un papel importante por tener una amplia visión quien no solo se interesa en la computación, sino que también quiere avanzar en el mundo de la programación, Visual Studio permite llegar de manera fácil y practica de desarrollo de

aplicaciones de escritorio y otros campos siendo una herramienta que tiene más de cuarenta años.

### **1.1. Antecedentes**

CROPWAT (CROP = Cultivo; WAT = Agua) desarrollado por Joss Swennehuis para la unidad de fomento y gestión de las aguas de la (FAO), el cual realiza los cálculos de requerimiento de agua de los cultivos y de sus requerimientos de riego en base a datos climáticos y cultivos existentes.

Área Bajo Riego Optimo (ABRO), desarrollado por el ministerio de asuntos campesinos y agropecuarios y riego, dirección general de servicios agropecuarios y riego unidad de agua y suelos. Este es un requisito para la elaboración de proyectos de riegos y planificación en la inversión pública en Bolivia, el cual realiza el balance hídrico en base a parámetros climáticos de promedios mensuales.

Gestar es un paquete informático de referencia para la ingeniería hidráulica de sistema de riego a presión que faculta para su mejor diseño, ejecución y gestión, con una completa selección de recursos muchos de ellos disponibles de forma exclusiva y una larga trayectoria de innovaciones y aplicaciones a grandes y pequeños sistema, el programa fue elaborado por la Universidad de Zaragoza-España, el mismo está disponible en tres versiones: Educacional (utilidades completas, limite en número de nodos y elementos), Profesional (utilidades limitadas, es necesario el registro el cual es gratuito como usuario y necesita una conexión a internet) y Premium (aplicación completa debido a la otorgación de una licencia proporcionada por Gestar).

Tlaloc y Aqua los cuales fueron elaborados por el ingeniero agrónomo Veintimilla M; Tlaloc fue elaborado como tesis de grado en la Universidad Agraria del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrarias en el año (2012) y en el año (2013) Aqua la siguiente versión los cuales facilitan el proceso de diseño de sistemas de riego, ambos están disponibles de manera gratuita.

Riego Localizado (RiegoLoc), realizado por Dr. Lopez J & Ing. Cordero L (2002); para el diseño y evaluación de instalación de riego localizado, el cual permite el desarrollo del



diseño agronómico, tolerancia de presiones, diseño de laterales, diseño de terciarias, Utilidades el cual permite realizar el diseño de la tubería principal, cada uno de estos procedimientos está dividido en subprogramas por lo cual los autores sugieren realizarlo en el orden que se cita el programa.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

- Elaborar un programa informático de aplicación para diseño agronómico e hidráulico en el método de riego por goteo.

### 2.2. Objetivos específicos

- Comparar el procedimiento del diseño agronómico con lavado de sales y sin lavado de sales.
- Incorporar la ecuación de Pouseuille para el cálculo de la viscosidad cinemática del agua y comparar con la viscosidad obtenida en tablas en función a la temperatura del agua en el diseño hidráulico.
- Diseñar un programa con los parámetros técnicos recomendados mediante el uso de diagramas de flujo en base a algoritmos del riego por goteo.
- Comparar los resultados obtenidos con el programa Agrologic con otros métodos para los cálculos del diseño agronómico e hidráulico y evaluar el sistema de riego por goteo.

### 2.3. Hipótesis

- Ho: El programa no es fácil de usar, los resultados no son válidos para el diseño agronómico e hidráulico.

### 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Descripción del riego por goteo

Es este método el riego se aplica directamente al suelo, gota a gota utilizando unos aparatos llamados goteros, los cuales necesitan presión para su funcionamiento, aunque esta presión es mucho más baja que la que se necesita en riego por aspersión. La presión se obtiene mediante un equipo de bombeo o por la diferencia de nivel entre la fuente del agua y los emisores esta diferencia puede ser de 3 a 10 m; de acuerdo al tipo de gotero. (Mendoza, 2013)

Según la Escuela Agrícola Panamericana (2012), menciona que, la presión de operación del emisor oscila entre 5 y 15 PSI y el caudal que entregan los emisores es función de la presión en la línea, normalmente en goteo varía entre 2 a 10 litros por hora. el agua se conduce desde el depósito o la fuente de abastecimiento a través de tuberías y en su destino se libera gota a gota justo en el lugar donde se ubica la planta el agua se infiltra hasta producir una zona húmeda restringida a un espacio concreto que funciona en vertical y horizontal.

Mendoza (2013), menciona que la producción agrícola depende del agua, en donde existen dos estaciones, la estación lluviosa y estación seca, la producción agrícola se concentra en la estación lluviosa y existen pocas tierras cultivadas en la estación seca. Cuando los goteros aplican el agua, esta se infiltra y va formando en el interior del suelo un humedecimiento en forma de cebolla, al cual se le llama bulbo húmedo. Este bulbo presenta un diámetro pequeño en la superficie del suelo, pero se ensancha adquiriendo su máximo diámetro a una profundidad de 30 cm aproximadamente.

Escuela Agrícola Panamericana (2012), menciona que las necesidades de riego de un cultivo dependen de la evaporación del agua dada según el sitio donde se mida, la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración, se define como requerimiento de agua del cultivo.

Tarjuelo (2010), indica que la aplicación del riego es satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, aplicando el agua uniformemente y de forma eficiente, la mayor cantidad de agua aplicada quede almacenada en la zona radicular a disposición del cultivo.

Tarjuelo (2010), Indica que el perfeccionamiento del riego obliga a asimilar las nuevas tecnologías para optimizar el diseño y la construcción de los equipos de riego, mejorar la eficiencia de utilización del agua y la energía, permitir una adecuada mecanización y automatización de la aplicación del agua y demás labores agrícolas, utilizar racionalmente los recursos hídricos de modo que garanticen su propia existencia y del medio ambiente.

Fernández (2010), indica que el riego localizado supone aplicar el agua solo en una zona determinada del suelo, no a su totalidad, lo que constituye la principal diferencia con respecto a los sistemas anteriores. Al igual que el riego por aspersión, el agua circula a presión por un sistema de tuberías (principales, secundarias, terciarias y ramales) desplegado sobre la superficie del suelo o enterrado en este y finalmente sale por los emisores de riego localizado con poca o nula presión a través de orificios, generalmente de muy pequeño tamaño.

Chipana (1996), indica que las principales ventajas y desventajas del riego localizado son:

#### Ventajas

- Asegura una uniforme distribución de agua y fertilizantes.
- Puede ser instalado en superficies irregulares.
- Es un sistema permanente pudiendo ser automático, economizando mano de obra.
- Permite la utilización continua del equipo.
- El agua es conducida directamente a las raíces, eliminándose las pérdidas de percolación y evaporación.
- Puede ser aplicado a casi todo tipo de suelos.
- No requiere sistematización de tierras, pudiendo emplearse en áreas de topografía irregular.

- Existe un ahorro de mano de obra y energía.
- No interfiere con otras prácticas agrícolas.
- Baja incidencia de malezas.
- No sufre influencia del viento.
- Elevada eficiencia de aplicación (85 a 95 %).

#### Desventajas

- Elevada inversión inicial.
- Requiere necesariamente de un sistema de filtros.
- Posibilidad de obstrucción de los emisores.
- Necesita de personal capacitado para operar el sistema.

### **3.2. Componentes del riego por goteo**

Según Mendoza (2014), menciona que el riego por goteo debe contar como mínimo con los siguientes componentes:

- Fuente de energía.
- Cabezal de control.
- Red de tuberías.
- Goteros o emisores.
- Dispositivos de control.

#### **3.2.1. Fuente de energía**

Mendoza (2014), indica que, para el funcionamiento, los sistemas de riego por goteo necesitan de una fuente de energía para provocar la circulación del agua, superar las pérdidas de energía en el filtrado, tuberías y accesorios y ofrecer a los emisores la presión necesaria para su funcionamiento. La energía necesaria puede obtenerse mediante equipos de bombeo o mediante la energía potencial que se genera a partir de la diferencia de nivel entre el sitio de derivación del agua y la parcela de riego.

### 3.2.2. Cabezal de control

Mendoza (2014), menciona que el cabezal de control es el conjunto de elementos destinados a filtrar, tratar, medir inyectar el fertilizante y en general a suministrar el agua a la red de riego.

Chipana (2003), indica que los componentes del cabezal del control son: válvulas, manómetros, filtros, tanques de fertilizantes y un sistema de control de operación. La secuencia de los distintos componentes debe estar de acuerdo con las necesidades particulares de un proyecto, pero en modo general sigue el siguiente orden: conjunto moto-bomba, válvula volumétrica, válvula de retención (“by pass” o válvula anti retorno), salida para el tanque de fertilizante, sistema de filtros constituido por filtro de arena y/o filtro de malla, manómetro y salida para la red principal.

### 3.2.3. Red de tuberías

Chipana (2003), menciona que las tuberías empleadas en el riego localizado son de PE (polietileno) y PVC (Policloruro de vinilo), los fabricantes de estas tuberías deben proporcionar datos de presión de trabajo (valor de la presión interna máxima a la que en servicio puede estar sometida un tubo a la temperatura de utilización), diámetro interior medio y espesor.

Las tuberías de PVC normalmente se entierran debido a los rayos solares que descomponen los polímeros de PVC.

Los tubos de polietileno se pueden instalar al aire libre y es flexible y menos frágil. Qué las tuberías de PVC. Normalmente para las líneas laterales se emplean tubos de polietileno.

### 3.2.4. Goteros o emisores

Mendoza (2014), menciona que los emisores o goteros son los dispositivos por el medio de los cuales se aplica el agua al suelo, dado que el agua que circula en los laterales de riego posee presión, los goteros disipan la presión del agua de tal forma que sale a la atmosfera sin presión, en forma de gota.

### **3.2.4.1. Por su instalación en la tubería**

En línea son goteros que se instalan cortando la tubería e insertando los extremos del gotero, en los sitios de corte. El agua circula por el interior del gotero, que forma parte de la conducción (Mendoza, 2014).

Sobre la línea goteros de botón se instalan en la tubería en un orificio realizado con un equipo de perforación estos goteros se pueden colocar en tuberías de distintos diámetros (Escuela Agrícola Panamericana, 2012).

Integrados estos goteros se implantan en la tubería de polietileno durante el proceso de extrusión de la misma, con distintos espaciamientos (30 cm, 50 cm, etc.) y distintos caudales van termo soldados en su interior (Mendoza, 2014).

Mendoza (2014), menciona que las cintas de riego es una tubería integral de paredes delgadas con orificios en la misma cinta o goteros termo soldados en su interior.

### **3.2.4.2. Por su comportamiento hidráulico**

#### **Normales o estándar**

Son goteros que cuando mayor sea la presión existente más caudal de agua arrojan. Este tipo de goteros a su vez pueden ser de conducto largo, laberinto u orificio.

#### **Auto compensantes**

Son goteros que mantienen el caudal más o menos constante, aunque varía la presión de entrada, dentro de un determinado rango de presión al que se denomina intervalo de compensación. Son indicados para lugares donde hay grandes diferencias de presión debidas a desniveles topográficos o cuando existen a lo largo de la tubería lateral grandes pérdidas de carga.

#### **Relación caudal - presión**

Chipana (1996), menciona cualquiera que sea el tipo de emisor, salvo las cintas de exudación, existe una relación entre el caudal emitido y presión de servicio, la cual puede ser expresada por la siguiente relación:

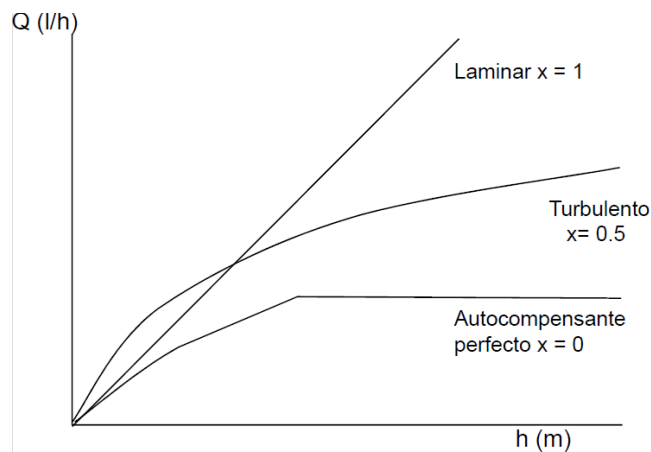
$$Q_e = K * H^x \quad (1)$$

Dónde:

- Q<sub>e</sub>: Caudal del emisor (l/h).
- K: Coeficiente de descarga (adimensional).
- x: Exponente de descarga (adimensional).
- H: Presión a la entrada del emisor (m. c. a.).

K, x son característicos de cada emisor y deben ser proporcionados por los fabricantes. X = 1 para régimen laminar la relación entre caudal y presión es lineal, en los autocompensantes x = 0.

**Figura 1.** Relación caudal-presión de un emisor.



**Fuente:** Chipana; 2003. Principios de riego y drenaje.

Mediante las pruebas experimentales se pueden determinar **K** y **x**:

Para determinar K y x se debe conocer la descarga de un gotero operando a dos diferentes presiones. A partir de q<sub>1</sub> a h<sub>1</sub> y q<sub>2</sub> a h<sub>2</sub> el exponente x se puede determinar como sigue:

$$x = \frac{\log\left(\frac{q_1}{q_2}\right)}{\log\left(\frac{h_1}{h_2}\right)} \quad (2)$$

Conocido el valor de x se puede obtener el valor de K despejándolo de la ecuación original.



### 3.2.5. Dispositivos de control

Mendoza (2013), menciona que las más usuales suelen destinarse para medir el caudal o el volumen de agua o bien la presión en cualquier punto del sistema, estos elementos imprescindibles en las instalaciones de riego localizado.

### 3.3. Calidad de agua disponible para el riego

En la evaluación de la calidad de riego se pone énfasis en las características químicas, y en menor medida, físicas, pero como veremos en la evaluación de un agua para riego juegan también otros factores como el tipo de suelo, de cultivo y las condiciones climáticas. (Prieto, 2008).

El estudio de la calidad del agua de riego es un paso inevitable al emprender un proyecto de riego. Un uso continuado de aguas de baja calidad, sin un manejo adecuado, puede provocar un deterioro de la calidad de los suelos cuya recuperación llega técnicamente dificultosa y en algunos casos económicamente inviable (Prieto, 2008).

La calidad del agua de riego determina los manejos necesarios del suelo de los cultivos y del riego para obtener una producción agrícola sostenible y en casos extremos, condiciona el tipo de cultivo que puede producirse (Prieto, 2008).

Prieto (2008), indica que, la calidad del agua de riego está íntimamente ligada al contenido de sales solubles. Los indicadores más utilizados son los siguientes:

- Sales totales.
- Concentración absoluta de iones.
- Concentración relativa de iones.

#### 3.3.1. Sales totales

Carrazón (2007), indica que, el agua de riego contiene determinadas sales que se añaden a las ya existentes en el suelo. Las sales que nos interesan son aquellos que, además de ser solubles, se descomponen en iones. Los iones son átomos o grupos de átomos con una carga eléctrica. Existen dos tipos de iones, los cationes (con carga

eléctrica positiva) y los aniones (con carga negativa), los iones más comunes que se encuentran en el agua son:

**Cuadro 1.** Iones mas comunes en el agua para riego y pesos equivalentes.

Cationes		Aniones	
Nombre y símbolo	P <sub>eq</sub>	Nombre y símbolo	P <sub>eq</sub>
Calcio (Ca <sup>2+</sup> )	20,0	Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	35,5
Sodio (Na <sup>+</sup> )	23,0	Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	48,0
Magnesio (Mg <sup>2+</sup> )	12,2	Bicarbonato (CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup> )	61,0
Potasio (K <sup>+</sup> )	39,1	Carbonato (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	30,0
Boro (B <sup>3+</sup> )	3,5	Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	62,0
Hierro (Fe <sup>2+</sup> )	27,9		

**Fuente:** Carrazón, 2007.

En la práctica la Conductividad Eléctrica (CE) es la forma más utilizada para expresar el contenido total de sales. La unidad de medición es el deciemens por m (dS/m) a 25 °C. La medida debe referenciarse a una temperatura, porque la actividad de los iones depende de la temperatura (Prieto, 2008).

Carrazón (2007), indica que a mayor cantidad de sales en el agua mejor conducirá esta electricidad. La **CE** se expresa en milimhos por centímetro (mmho/cm), micromhos por centímetro (µmho/cm) o en deciSiemens por metro (dS/m). la relación entre estas unidades es:

$$1 \text{ mmho/cm} = 1.000 \text{ µmho/cm} = 1 \text{ dS/m}$$

Palomino (2007), menciona que para mantener alejadas las sales, se recomienda aplicar agua adicional en cada riego, dependiendo de la tolerancia del cultivo a la salinidad, del tipo de suelo y la salinidad en el agua de riego o efectuar lavados iniciales del suelo.

### 3.3.1.1. Evaluación de la salinidad

Existen varios criterios que establecen si el agua puede usarse para el riego según la cantidad de sales disueltas en ella. La organización para la agricultura y alimentación

(FAO) indica el riesgo de producirse problemas de salinidad según los siguientes límites de contenido de sales. (Mendoza, 2013).

**Cuadro 2.** Riesgo de salinidad de acuerdo con los valores de C y CE (FAO).

C (g/litro)	CE (dS/m)	Riesgo
< 0,45	< 0,7	Ninguno
0,45 < C < 2	0,7 < CE < 3	Ligero a moderado
> 2	> 3	Alto, severo

Fuente: Mendoza A; 2013.

### 3.3.1.2. Tratamiento de los problemas de salinidad

Para evitar la acumulación de sales en la zona de las raíces, es necesario que la cantidad de sales desplazada por el lavado sea igual a la cantidad aportada por el agua de riego. Se llama requerimiento de lavado a la cantidad de agua que se requiere para disolver las sales y desplazarlas hasta capas más profundas (Mendoza, 2013).

Serrano (2015), indica que las necesidades de lavado de sales dependerán del método de riego empleado, considerando la diferencia en la frecuencia de aplicación que provoca el movimiento diferente del agua.

$$RL = \frac{CE_w}{2 * CE_{es} * f} \quad (3)$$

Dónde:

RL: Requerimiento de lavado de real.

CE<sub>w</sub>: Conductividad del agua de riego (mmhos/cm).

CE<sub>es</sub>: Conductividad del extracto de saturación del suelo deseada (mmhos/cm).

f: Eficiencia de lavado (depende del tipo de suelo).

La eficiencia de lavado varía desde 100 % en suelos arenosos, hasta el 30 % en suelos arcillosos.

### 3.3.1.3. Cultivos tolerantes a la salinidad

Existe un problema de salinización cuando las sales solubles se acumulan en la zona radical de los cultivos hasta niveles o concentraciones que causan pérdidas de rendimiento. Como el agua es el principal transporte, su acumulación en la zona radical se produce por aporte directo del agua de riego o a partir del ascenso desde las capas freáticas cercanas a la superficie (Prieto, 2007).

Si las prácticas mencionadas anteriormente no son suficientes para el control de la salinidad, será necesario implantar cultivos que presenten una tolerancia mayor a los efectos de la salinidad (Mendoza, 2013).

Hay que citar que la tolerancia de los cultivos a la salinidad está definida por la CE del extracto de saturación. La acción de las aguas salinas sobre el suelo es aún más perniciosa que sobre las plantas, debido a que las sales se pueden ir acumulando en el suelo hasta hacerlo improductivo (Mendoza, 2013).

Prieto (2008), indica que: la salinidad reduce la disponibilidad de agua para los cultivos, estos responden de diferentes formas. Algunos pueden producir rendimientos aceptables a niveles de salinidad relativamente altos respecto de otros. Esta mayor tolerancia tiene que ver con una mayor capacidad para realizar ajustes osmóticos que permiten generar los gradientes de potencial necesarios para extraer agua de los suelos salinos. El Cuadro 3 resume parte de la información disponible sobre la tolerancia de los cultivos agrícolas, hortícolas o forrajeros y arbóreos a la salinidad.

**Cuadro 3.** Tolerancia de los cultivos a distintos niveles de salinidad de agua de riego ( $CE_r$ ) y del extracto de saturación del suelo ( $CE_{es}$ ).

Cultivos Extensivos	%100		%90		%75		%50		Máximo
	$CE_r$	$CE_{es}$	$CE_r$	$CE_{es}$	$CE_r$	$CE_{es}$	$CE_r$	$CE_{es}$	$CE_{es}$
Cebada	5,3	8	6,7	10,0	8,7	13,0	12,0	18,0	28,0
Judías grano	0,7	1,0	1,0	1,5	1,5	2,3	2,4	3,6	7,0
Habas grano	1,1	1,6	1,8	2,6	2,0	4,2	4,5	6,8	12,0
Habas grano	1,1	1,6	1,8	2,6	2,0	4,2	4,5	6,8	12,0
Maíz	1,1	1,7	1,7	2,5	2,5	3,8	3,9	5,9	10,0
Algodón	5,1	1,7	6,4	9,6	8,4	13,0	12,0	17,0	27,0
Cacahuete	2,1	3,2	2,4	3,5	2,7	4,1	3,3	4,9	7,0
Arroz	2,0	3,0	2,6	3,8	3,4	5,1	4,8	7,2	12,0
Sorgo	2,7	4,0	3,4	5,1	4,8	7,2	7,2	11,0	18,0
Soja	3,3	3,0	3,7	5,5	4,2	6,2	5,0	7,5	10,0
Remolacha azucarera	4,7	7,0	5,8	8,7	7,5	11,0	10,0	15,0	24,0
Trigo	4,0	6,0	4,9	7,4	6,4	9,5	8,7	3,0	20,0

Cultivos Hortícolas	100%		90%		75%		50%		Máximo
	$CE_r$	$CE_{es}$	$CE_r$	$CE_{es}$	$CE_r$	$CE_{es}$	$CE_r$	$CE_{es}$	$CE_{es}$
Judías verdes	0,7	1,0	1,0	1,5	1,5	2,3	2,4	3,6	7,0
Remolacha huerto	2,7	4,0	3,4	5,1	4,5	6,8	6,4	9,6	15,0
Coles	1,2	1,8	1,9	2,8	2,9	4,4	4,6	7,0	12,0
Melón	1,5	2,2	2,4	3,6	3,8	5,7	6,1	9,1	16,0
Pepino	1,7	2,5	2,2	3,3	2,9	4,4	4,2	6,3	10,0
Lechugas	0,9	1,3	1,4	2,1	2,1	3,2	3,4	5,2	9,0
Cebollas	0,8	1,2	1,2	1,8	1,8	2,8	2,9	4,3	8,0
Pimientos	1,0	1,5	1,5	2,2	2,2	3,3	3,4	5,1	9,0
Patatas	1,1	1,7	1,7	2,5	2,5	3,8	3,9	5,9	10,0
Espinaca	1,3	2,0	2,2	3,3	3,5	5,3	5,7	8,6	15,0
Maíz dulce	1,1	1,7	1,7	2,5	2,5	3,8	3,9	5,9	10,0
Fresa	0,7	1,0	0,9	1,3	1,2	1,8	1,7	2,5	4,0
Tomates	1,7	2,5	2,3	3,5	3,4	5,0	5,0	7,6	13,0
Alfalfa	1,3	2,0	2,2	3,4	3,6	5,4	5,9	8,8	16,0

Cultivos Forrajeros	100%		90%		75%		50%		Máximo
	CE <sub>r</sub>	CE <sub>es</sub>	CE <sub>r</sub>	CE <sub>es</sub>	CE <sub>r</sub>	CE <sub>es</sub>	CE <sub>r</sub>	CE <sub>es</sub>	CE <sub>r</sub>
Cebada	4,0	6,0	4,9	7,4	6,3	9,5	8,7	13,0	20,0
Maíz	1,2	1,8	2,1	3,2	3,5	5,2	5,7	8,6	16,0
Centeno	3,7	5,6	4,6	6,9	5,9	8,9	8,1	12,2	19,0
Pasto sudan	1,9	2,8	3,4	5,1	5,7	8,6	9,6	14,4	26,0
Trébol grande	1,5	2,3	1,9	2,8	2,4	3,6	3,3	4,9	8,0
Trébol pequeño	3,3	5,0	4,0	6,0	6,0	7,5	6,7	10,0	15,0
Trébol forrajero	5,0	7,5	6,0	9,0	7,4	11,0	9,8	15,0	22,0

Cultivos Frutales	100%		90%		75%		50%		Máximo
	CE <sub>r</sub>	CE <sub>es</sub>	CE <sub>r</sub>	CE <sub>es</sub>	CE <sub>r</sub>	CE <sub>es</sub>	CE <sub>r</sub>	CE <sub>es</sub>	CE <sub>r</sub>
Albaricoquero	1,1	1,6	1,3	2,0	1,8	2,6	2,5	3,7	6,0
Aguacate	0,9	1,3	1,2	1,8	1,7	2,5	2,4	3,7	6,0
Vid	1,0	1,5	1,7	2,5	2,7	4,1	4,5	6,7	12,0
Almendro	1,0	1,5	1,4	2,0	1,9	2,8	2,7	4,1	7,0
Manzano, peral	1,0	1,7	1,6	2,3	2,2	3,3	3,2	4,8	8,0
Limonero	1,1	1,7	1,6	2,3	2,2	3,3	3,2	4,8	8,0
Naranja	1,1	1,7	1,6	2,3	2,2	3,2	3,2	4,8	8,0
Melocotonero	1,1	1,7	1,4	2,2	1,9	2,9	2,7	4,1	7,0
Ciruelo	1,0	1,5	1,4	2,1	1,9	2,9	2,8	4,3	7,0
Nogal	1,1	1,7	1,6	2,3	2,2	3,3	3,2	4,8	8,0

Fuente: Ayres y Westcote (1985) y Rhoades, Kandia y Mashali (1992), citado por Serrano, 2015 (Apuntes de métodos y sistemas de riego).

### 3.3.2. Concentración absoluta de iones

La concentración absoluta de iones específicos en el agua se expresa en la mayoría de los casos utilizando las unidades de concentración meq/l. Actualmente es muy utilizada el milimol concentración (mmo<sub>d</sub>/l) que es numéricamente igual a meq/L. (Prieto, 2008)

### 3.3.3. Concentración relativa de iones

La concentración relativa de iones es uno de los problemas más preocupantes que trae aparejado el uso de aguas de baja calidad es el aumento de la proporción de Na retenido en el complejo de intercambio de los suelos. Este proceso conocido como

sodificación de los suelos, tiene importantes consecuencias negativas en las propiedades físicas que afectan principalmente el movimiento del agua en el suelo. (Prieto, 2008)

### 3.3.3.1. Sodificación

Para evaluar la calidad del agua desde este punto de vista, se necesita conocer el contenido relativo de los diferentes iones y en especial, la relación entre el sodio y los principales cationes bivalentes Ca y Mg (Prieto, 2008).

Mendoza (2013), menciona que, con esta finalidad, para evaluar los problemas de infiltración ocasionados por la presencia de sodio en el agua de riego, se han propuesto varios índices de los cuales el más utilizado es el índice denominado RAS (Relación de Adsorción de Sodio), este índice mide la cantidad de sodio y su actividad (dependiendo de la cantidad de calcio y magnesio presentes) y viene definido por la siguiente formula:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (4)$$

Dónde:

$Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  representan, respectivamente las concentraciones de los iones de sodio, calcio y magnesio del agua de riego, expresado en meq/litro.

Prieto (2008), Indica que unos años más tarde los mismos autores, (Ayers y Westcott, 1985), en función de trabajos de Oster y Schroer, 1979 y Suarez 1981, demostraron que el procedimiento de ajuste propuesto sobrestimaba el peligro de sodificación sugirieron el uso de un factor de 0,5 para el RAS aj, y recomendaron la utilización de un nuevo procedimiento propuesto por Suarez en 1981 o en su defecto la utilización de la propuesta original del cálculo de RAS.

En el nuevo procedimiento de ajuste de RAS se corrige la concentración de calcio del agua de riego en función del valor de equilibrio esperable debido al efecto del dióxido de carbono ( $CO_2$ ), de los bicarbonatos ( $HCO_3$ ) y la salinidad (CE). El procedimiento asume la existencia de una fuente de calcio, los carbonatos presentes en el suelo u otros minerales y la no precipitación de magnesio.

La nueva propuesta de ajuste del RAS surge de la siguiente expresión:

$$RAS_{aju} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca_x + Mg}{2}}} \quad (5)$$

### 3.4. Diseño de sistema de riego por goteo

Serrano (2015), menciona que el diseño de un sistema de riego por goteo demanda un conjunto de conocimientos relacionados al sistema suelo, planta, atmosfera y su complementación con la infraestructura hidráulica, que comprende la selección de los materiales dispositivos y equipos en base a una apropiada administración de principios, criterios, normas y condiciones hidráulicas, que nos permiten analizar y plantear alternativas adecuadas en los proyectos de riego presurizado.

Serrano (2015), indica que, entre las consideraciones previas para el diseño de un sistema de riego por goteo, se deberá identificar la calidad del agua en los parámetros físicos y químicos, considerando que tienen relación con las partículas en suspensión y que pueden sedimentar, generando la obstrucción de los emisores o incrementar el costo por el excesivo uso o mantenimiento de filtros, así como para los efectos de prevenir el tratamiento necesario en el agua de riego.

#### 3.4.1. Diseño agronómico

Fernández (2010), indica que el proceso del diseño de una instalación de riego comienza reuniendo información de tipo de agronómico acerca del tipo de suelo, cantidad y calidad de agua, clima, y cultivos, así como sobre la topografía y dimensiones de la zona a regar. También habrá que considerar la capacidad del agricultor para soportar el costo de instalación y su explotación, la viabilidad para realizar las técnicas de cultivo, y la posibilidad de formación para el manejo de la instalación.

Franco y Pérez. (2007), Mencionan que para diseñar un sistema de riego hay que determinar todas las características técnicas del riego. Con el fin de que el reparto del agua sea uniforme y eficiente se hace en dos etapas: en el diseño agronómico se



consideran aquellos aspectos relacionados con el medio (suelos, clima, cultivo, etc.) y en el diseño hidráulico se dimensiona la red de distribución. Los datos imprescindibles que se necesitan son los siguientes:

- Suelo: densidad aparente ( $D_{ap}$ ), humedad a capacidad de campo ( $U_{cc}$ ), humedad a punto de marchitamiento ( $U_{pmp}$ ) y velocidad de infiltración ( $I_b$ ).
- Clima: datos relativos del viento, evapotranspiración ( $ET_o$ ).
- Cultivo: necesidades hídricas, fracción de agotamiento del agua disponible ( $f$ ), profundidad radicular ( $Pr$ ), marco de plantación.
- Parcela: dimensiones, topografía, captación de agua y área a regar.
- Agua: caudal disponible y calidad agronómica.
- Riego: tiempo disponible de riego durante el ciclo de antemano fijando la eficiencia que se pretende conseguir.

Fernández (2010), menciona desde el punto de vista el diseño agronómico lo que realmente interesa conocer son las necesidades de agua en épocas en que el cultivo requiere mayor cantidad, y en función a ese valor se determinaran las dimensiones de los componentes de la instalación de riego.

#### **3.4.1.1. Eficiencia de aplicación**

Carrazón, 2007 indica que, en los sistemas de riego siempre se producen una serie de perdidas tanto en la conducción del agua hasta la parcela (roturas, fugas, etc.) como en la aplicación del agua al cultivo (percolación, viento, escorrentía, etc.).

En el riego localizado es posible controlar de mejor manera las pérdidas de agua, determinando el requerimiento para los diferentes periodos de desarrollo del cultivo, tipo de suelo y umbral de riego básicamente. Pero en práctica esto es difícil de determinar en todas las plantas estos niveles ya que el suelo no es de composición homogénea, aparte se pierde por la evaporación (Serrano, 2015).

Salas y Pérez (2007), indican que los valores de eficiencia de aplicación ( $E_a$ ). Proporcionados por Keller (1978); se deben distinguir dos casos: Clima árido y húmedo (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Eficiencia de aplicación relacionada a clima, profundidad y textura.

Clima.	Profundidad Radicular (cm).	"Ea" según Textura.			
		Gravosa	Gruesa	Media	Fina
Árido	< a 75	0,85	0,90	0,95	0,95
	75 a 150	0,90	0,90	0,95	0,95
	> a 150	0,95	0,95	1,00	1,00
Húmedo	< a 75	0,65	0,75	0,85	0,90
	75 a 150	0,75	0,80	0,90	0,95
	> a 150	0,85	0,90	0,95	1,00

Fuente: Salas y Pérez (2007), citado por (Serrano G; 2015).

La **Ea** es un parámetro importante en la determinación de la necesidad bruta, por tanto, es recomendable trabajar con valores fiables que son obtenidos a partir de evaluaciones realizadas en parcelas representativas.

#### 3.4.1.2. Factor de cobertura

Chipana (1996), menciona que como en riego por goteo solo parte del suelo es humedecido, es decir, solo una parte del área comprendida entre la distancia entre plantas y la distancia entre hileras. El factor de cobertura ( $K_r$ ) representa la parte del área total cubierta por el cultivo.

El factor de cobertura  $K_r$ , se determina mediante el porcentaje del área cubierta, midiéndose los lados del cuadrado representado por la proyección horizontal de la copa del árbol en relación al espaciamiento o área total. Para especies frutícolas, este valor puede ser obtenido a través de mediciones directas del campo para cultivos de espaciamiento reducido, cuya vegetación cubre la superficie del suelo, se adopta el valor máximo (Chipana, 1996).

Existen varias ecuaciones que intentan representar adecuadamente  $K_r$ , sin embargo, existen controversias para ello a continuación mencionaremos algunas relaciones:

$$K_r = 1,34 * A \quad \text{Aljibury et. al.} \quad (6)$$

$$K_r = 0,1 + A \quad \text{Decroix.} \quad (7)$$

$$K_r = A + 0,5 * (1 - A) \quad \text{Hoare et. al.} \quad (8)$$

$$Kr = A + 0,15 * (1 - A) \quad \text{Keller.} \quad (9)$$

### 3.4.1.3. Determinación de intervalo de riego y tiempo de riego

Serrano (2015), indica que. La frecuencia de riego o intervalo de riego, es el lapso de tiempo máximo en días, en el cual la reserva de agua fácilmente aprovechable (Zn) es agotada por la demanda o necesidad neta (Nn) durante la fase de crecimiento de un cultivo dado. Para el riego por goteo se estima la siguiente formula:

$$Fr = \frac{Zn * Pm}{ETc * Kr} = \frac{Znr}{ETcr} \quad (10)$$

Dónde:

- Fr: Frecuencia de riego.
- Pm: Porcentaje de mojado mínimo.
- ETc: Evapotranspiración del cultivo.
- Kr: Coeficiente de cobertura.

Para el diseño de las instalaciones no se toma en cuenta las eventuales dotaciones de agua natural (Precipitación, capilaridad etc.). Por lo tanto, la necesidad del periodo más crítico será la necesidad máxima que coincide con la evapotranspiración máxima del cultivo en el periodo más crítico. A objeto de no afectar las expectativas del rendimiento e ingresar a situaciones de estrés hídrico, se puede considerar una frecuencia de cualquiera que sea menor o igual al determinado con la ecuación (Serrano, 2015).

Serrano (2015), indica que, si consideramos el movimiento de infiltración del agua como uniforme, podemos estimar el tiempo de riego mediante la siguiente relación:

$$Tr = \frac{Zbc}{Ib} \quad (11)$$

### 3.4.2. Diseño hidráulico

Franco y Pérez (2007), mencionan el diseño hidráulico tiene por finalidad el cálculo de las dimensiones de la red de distribución y de la optimización del trazado de la misma, de forma que se pueda aplicar el agua suficiente para los cultivos durante cualquiera de sus formas de desarrollo, otro objeto es conseguir que la aplicación del agua en forma

de lluvia sobre el suelo sea suficiente uniforme. Con todo ello se obtendrán buenas producciones con el menor gasto de agua.

Mendoza (2013), Menciona el diseño hidráulico consiste en determinar las dimensiones de los diferentes componentes del sistema de tal manera que funcione adecuadamente con altos niveles de uniformidad. El dimensionamiento del sistema está determinado por las condiciones de operación previstas, en función a las características de la topografía, el suelo y el cultivo, para el diseño hidráulico recomienda tener en cuenta los criterios y consideraciones siguientes:

Longitud de la tubería, diámetro, tipo de material, pendiente del terreno, presión de servicio, distancia entre emisores, caudal del emisor y pérdida de carga.

Franco y Pérez (2007), recomiendan que como norma general no convenga sobrepasar la velocidad de 3 m/s. En ramales porta emisores, porta laterales y, en general, en las conducciones que tienen muchas salidas conviene una velocidad de alrededor de 1 m/s. En el resto de las tuberías de riego se puede mantener una velocidad de alrededor de 1,5 - 2 m/s. En las tuberías de impulsión no se debe sobrepasar los 2 m/s, siendo aconsejable un intervalo de 0,8 a 1,5 m/s, que es lo correspondiente al mínimo coste. La velocidad mínima se sitúa alrededor de 0,5 m/s; si el agua lleva partículas en suspensión no se debe bajar de 0,6 m/s.

#### **3.4.2.1. Pérdida de carga**

Carrazón (2007), indica que las tuberías de conducción y distribución, generalmente se componen de tramos rectos y curvos a objeto a sujetarse al accidente topográfico del terreno y condiciones de distribución, también se presentan cambios en la geometría de la sección e incluyen diferentes dispositivos para el control de las descargas (válvulas y compuertas).

Estos cambios originan pérdidas de energía, distintos a los de la fricción, además están localizadas en el mismo sitio de cambio del cambio de geometría o de la alteración del flujo (Serrano, 2010).

Veintimilla (2013), indica que la ecuación de Darcy Weisbach es una de las fórmulas más exactas, sin embargo, por su complejidad en el cálculo del factor de fricción ( $f$ ) ha caído en desuso. Aun así, se puede utilizar para el cálculo de la pérdida de carga en tuberías de fundición.

La fórmula de carga por fricción está dada por la fórmula de Darcy Weisbach:

$$hf = 8 * f * \frac{L * Q^2}{D^5 * g * \pi^2} \quad (12)$$

Dónde:

- hf: pérdida de carga. (m.c.a.)
- f: factor de fricción.
- Q: caudal (m<sup>3</sup>/s)
- D: Diámetro (m)
- g: gravedad (m/s<sup>2</sup>)

Serrano (2010), menciona que, para todas las tuberías, el instituto hidráulico de los Estados Unidos y la mayoría de los profesionales en el ramo consideran la ecuación de Colebrook, como la más aceptable para calcular  $f$ , esta ecuación es de la siguiente forma:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log\left(\frac{\varepsilon}{3,71 * D} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}}\right) \quad (13)$$

Carrazón (2007), indica que en la ecuación de Colebrook existe una dificultad para calcular  $f$ , ya que aparece en ambos lados de la fórmula (en otras palabras, no se puede despejar  $f$ ), esto es lo que en matemáticas se denomina ecuación implícita, y la única manera de resolverla es mediante aproximaciones sucesivas, con ayuda de calculadoras científicas programables o computadoras.

Veintimilla (2013), indica que el método de Hazen Williams es válido solamente para el agua que fluye en las temperaturas ordinarias (5 °C – 25 °C) la fórmula es sencilla y su cálculo es simple debido a que el coeficiente de rugosidad ( $C$ ) no es función de la velocidad ni del diámetro de la tubería.

Carrazón (2007), indica que **C** es un factor que depende del material y el desgaste de la tubería, y que no tiene unidades. Los valores que toma **C** para los materiales más utilizados en minirriego son:

**Cuadro 5.** Valores del factor C de la ecuación de Hazen Williams.

Material	C
PVC	150
PE (Poliducto)	140
HG	100

Fuente: Carrazón; 2007.

$$hf = \frac{10.64 * Q^{1.85} * L}{D^{4.87} * C^{1.85}} \quad (14)$$

Serrano (2015), indica que, la formula general de Blasius se encuentra en términos de viscosidad:

$$hf = 0.0246 * v^{0.25} * \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} * L \quad (15)$$

Dónde:

- hf: Perdida de carga (m.c.a.)
- u: Viscosidad cinemática del agua (m<sup>2</sup>/s)
- Q: Caudal (m<sup>3</sup>/s)
- D: Diámetro (m)
- L: Longitud (m)

### 3.4.2.2. Factor de ajuste en tuberías de salida múltiple

Serrano (2015), indica que el valor de la perdida de carga (hf) dependerá de la distribución del gasto entrante Q<sub>0</sub> a lo largo de la longitud del ramal dividida en tramos, siendo la magnitud de gasto en cada uno de ellos acorde con el gasto saliente de los emisores aguas abajo.

El empleo de un ordenador facilita este cálculo de tipo iterativo, pero Christiansen propuso un método de estimación rápida y suficientemente aproximado, que consiste

en aplicar un factor reductor (**F**) a las pérdidas de carga que produciría una corriente uniforme de gasto **Qo**. (Serrano, 2015)

Para explicar esto Christiansen desarrollo un factor **F** por lo tanto para determinar la perdida de carga en una tubería de longitud L con n salidas bastara realizar.

$$hf' = hf * F \quad (16)$$

Veintimilla (2013), indica que el factor de **F** desarrollado por Christiansen para diferentes ubicaciones es:

Cuando el emisor está situado a una distancia entera.

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2*N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6*N^2} \quad (17)$$

Cuando el emisor está situado al inicio del lateral.

$$F = \frac{N * \left( \frac{1}{m-1} + \frac{1}{2*N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6*N^2} \right) - 1}{N-1} \quad (18)$$

Cuando el emisor está situado a una distancia media del lateral.

$$F = \frac{2*N}{2*N-1} * \left( \frac{1}{m-1} + \frac{\sqrt{m-1}}{6*N^2} \right) \quad (19)$$

Dónde:

N: Número de salidas.

m: Exponente del caudal de acuerdo a la fórmula de la perdida de carga.

### 3.5. Elaboración de un programa

Ríos. (2014), menciona que para diseñar un programa es aconsejable realizar los siguientes pasos: Definición y análisis del problema, creación del algoritmo, representación del algoritmo, prueba de escritorio, codificación, compilación, depuración, ejecución, mantenimiento.

### **3.5.1. Definición y análisis del problema**

Ríos (2014), indica que como primer paso se debe leer el problema, entender el enunciado, pensar cómo resolver el problema, para ayudar en este análisis es bueno pensar en los tres puntos básicos (entrada/ proceso/ salida) que nos ayudara a identificar los datos que necesitamos en la solución del problema.

### **3.5.2. Creación del algoritmo**

Ríos (2014), menciona que en este paso ayudándose del análisis y el enunciado del problema, se realiza la formulación de la solución del problema de una manera clara y precisa.

### **3.5.3. Representación del algoritmo**











Ríos (2014), menciona que en este paso existen varios métodos de representar un algoritmo los mismos que tienen ciertas reglas y que cualquier programador podría entenderlo y posteriormente codificarlos en un lenguaje de programación.

#### **3.5.3.1. Diagrama de flujo**

Ríos. (2014), indica que un diagrama de flujo es la representación básica de un algoritmo (un algoritmo son pasos secuenciales para el desarrollo de una tarea) usando figuras geométricas relacionándose entre sí indicando el orden en el que se ejecutan los procesos, para luego pasarlos al lenguaje de programación dentro de la computadora.



**Figura 2.** Figuras geométricas usadas en los diagramas de flujo.

Símbolo	Nombre	Función
	Inicio / Fin	Indica el inicio y el fin de un programa.
	Entrada de datos	Representa la entrada de datos por teclado.
	Proceso	Realiza el proceso de las operaciones.
	Salida	Muestra la salida de datos impresos.
	Condición	Realiza una pregunta y solo tiene dos condiciones de verdad "Si" o falso "No".
	Estructura iterativa	Permite repetir un conjunto de procesos un número finito de veces usando para esto un control que puede ser un contador o una condición.
	Subprograma	Es la división del programa principal en pequeños subprogramas los cuales trabajan de manera independiente o la unión de todos ellos para resolver un problema completo.
	Base de datos	Representa el almacenaje de los datos existentes en una base de datos.
	Conector de paginas	Representa la unión de una página con otra en la cual continua el diagrama de flujo.
	Dirección de flujo	Conecta los símbolos, señalando el orden en que se realiza el proceso de las distintas operaciones.

**Fuente:** Ríos (2014), Diagramas de flujo.

### 3.5.4. Prueba de escritorio

Ríos (2014), menciona que, en este paso consiste en verificar el funcionamiento de la representación del algoritmo, para lo cual se anotan todas las variables que se usan y se ejecuta el diagrama según el sentido de las flechas asignadas, escribiendo como entrada cualquier valor o datos, realizar el proceso y revisar que en la salida se obtenga los datos esperados se debe ingresar al paso y revisar nuevamente todo el análisis.

### **3.5.5. Codificación, compilación, depuración y ejecución**

Ríos (2014), menciona que estos pasos se realizan en una computadora, utilizando para esto un lenguaje de programación en el cual en base al diagrama de flujo u otro método se realiza:

#### **3.5.5.1. Codificación**

Ríos (2014), indica este paso consiste en traducir las figuras del diagrama de flujo por instrucciones en un lenguaje de programación, esto se lo realiza generalmente directo en la computadora, aunque a veces se lo puede realizar en papel.

#### **3.5.5.2. Compilación**

Ríos (2014), menciona este paso lo realiza íntegramente la computadora, es la revisión que la computadora realiza al código del programa indicando la cantidad de errores que se tenga en el código, donde en el mejor de los casos no presenta ningún error.

#### **3.5.5.3. Depuración**

Ríos (2014), Este paso lo realiza el programador, el cual debe arreglar los errores encontrados en el paso anterior hasta que no presente ningún error.

#### **3.5.5.4. Ejecución**

Ríos (2014), Este paso consiste en hacer funcionar el programa y ver como realiza el procesamiento para lo cual fue diseñado, donde simplemente se introducen los datos de entrada y se verifica las salidas.

### **3.5.6. Documentación**

Ríos (2014), Este paso lo realiza, el colocar mensajes o comentarios para que el programa sea más entendible por lo que existen dos tipos de documentación que son:

### **3.5.6.1. Documentación interna**

Ríos (2014), Son los comentarios o mensajes que se añaden al código fuente para hacer más claro el entendimiento de un proceso, también se usan en los diagramas de flujo.

### **3.5.6.2. Documentación externa**

Ríos (2014), indica que, Es la representación de la guía de usuario o informe para el manejo del programa o sistemas, este documento se presenta de forma escrita donde debe describir el análisis, diseño y todo lo necesario para que se pueda entender el sistema, como mínimo debe contener los siguientes puntos:

- Descripción del problema.
- Análisis del problema.
- Algoritmo (Diagrama de flujo)
- Diccionario de datos.
- Código fuente (Programa)
- Alcances y limitaciones.

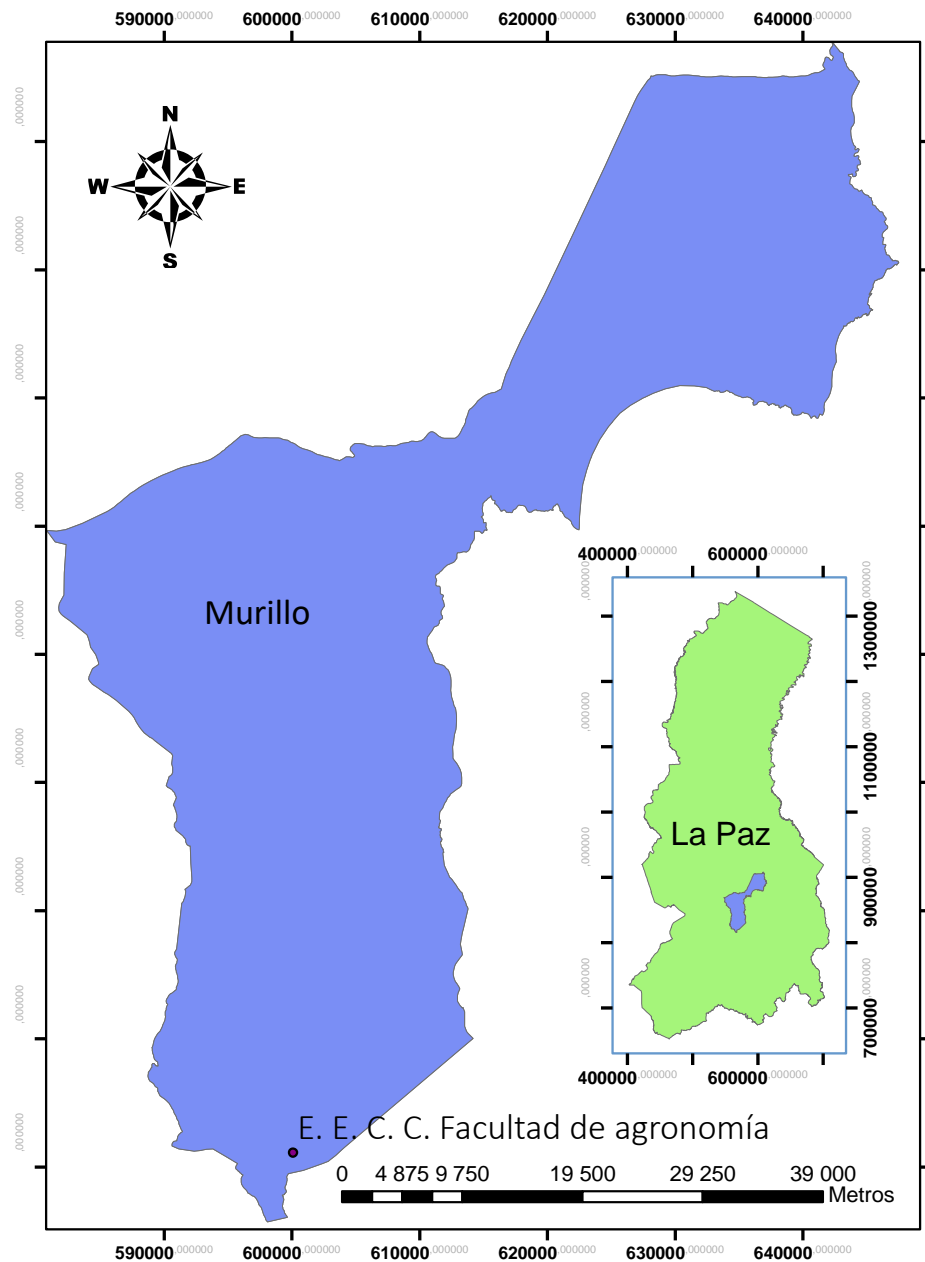
### **3.5.7. Mantenimiento**

El mantenimiento consiste en realizar mejoras y/o actualizaciones al programa para lograr un mejor desempeño ampliar sus acciones mientras se use el programa. (Ríos, 2014)

## **3.6. Visual Studio software de desarrollo**

Luna (2013), menciona que, desde el nacimiento de NET, la plataforma de desarrollo Visual Basic ha evolucionado en pos de la programación orientada a objetos. Esto permite a los programadores centralizarse en el diseño de aplicaciones Windows, Web y las actuales basadas en XAML, y reducir de manera considerable la escritura de código para generar una UI (User Interface) amigable. Esto es, justamente, lo que hace que este lenguaje de programación haga honor a su nombre: el desarrollo Visual.

García (1999), menciona que Visual Basic es uno de los lenguajes de programación que más entusiasmo despierta entre los programadores de Pcs, tanto como para expertos como a novatos, Visual Basic es un lenguaje de programación, visual también llamado lenguaje de generación. Esto quiere decir que un gran número de tareas se realizan sin escribir código simplemente con operaciones graficas realizadas con el ratón sobre la pantalla.



Universidad Mayor de San Andrés  
Facultad de Agronomía  
Ingeniería Agronómica  
**Figura 3. Plano de ubicación.**



Estación Experimental de Cota Cota	Provincia: Murillo	Departamento: La Paz
Proyección: UTM	Datum: WGS84	Zona: 19 S
Escala: 1:500.000	Fecha: 25/09/2019	Juan Jose Caparicona Marca

## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1. Localización**

La evaluación del sistema de riego por goteo se lo realizo en el Centro Experimental de Cota Cota que se encuentra dentro del Campus Universitario en el macro distrito de La Paz, ubicada geográficamente 16°32' de latitud Sur y 68°3' de longitud Oeste y una Altitud de 3445 m.s.n.m. (Facultad de Agronomía; 2012 – 2015).

### **4.2. Características ecológicas**

Tiene una precipitación fluctuante entre 600 a 800 mm/año, una temperatura media de 11.5°C, con estas características se ubica como cabecera de valle y es representativo para gran parte de los valles del departamento de La Paz (Facultad de Agronomía; 2012 – 2015).

### **4.3. Materiales**

#### **4.3.1. Material de escritorio**

Para la realización del programa AgroLogic se usó lo siguiente:

- Una computadora con las siguientes características:

Procesador: Intel® Core™ i3 -228M CPU @ 2.20 GHz.

Memoria RAM de 4 GB (3.90 GB utilizable) 64 bits, Sistema Operativo Microsoft.

Tarjeta de video Intel Graphics ® HD Graphics 3000.

- Software de desarrollo Microsoft Visual Studio 2015.
- Microsoft Access 2010.
- Microsoft Visio 2010.
- Microsoft Excel 2010.
- Calculadora Casio Classpad II. (Versión 02.01.5000.0000)

### 4.3.2. Material de campo

Para la evaluación del sistema de riego por goteo, se usó los siguientes materiales:

- Cinta de goteo.
- Manómetro.
- Vasos (pluviómetro).
- Probeta.
- Cronometro.
- Cinta métrica.
- Cuaderno de campo.

### 4.4. Métodos

Para el procedimiento del diseño agronómico se recolecto datos provenientes de tesis de grado que se realizaron en la Estación Experimental de Cota Cota, para esto se revisó los datos de suelo, agua, cultivo y clima.

Medrano R. (2006), indica que las características del suelo son las siguientes: textura Franco arcillosa (FY), Humedad a capacidad de campo (Ucc) 27%, Humedad a punto de marchitez permanente (Upmp) 11% y densidad aparente (Dap) 1,15 gr/cc, agua: conductividad eléctrica del agua (Cew) 0,03009 dS/m y caudal disponible de 2,04 lt/hr. Según la FAO (Cuadro 7), de acuerdo a la referencia de la textura del suelo en la estación experimental los datos de infiltración básica (Ib) 13 mm/hr y la eficiencia de lavado (Efl) 0,9.

Según la (FAO), El cultivo de la lechuga (*Lactuca sativa sp.*) tiene como datos: profundidad radicular (Pr) 0,3 m, factor de agotamiento (f) 0,3, y coeficiente de cultivo (media) (Kr) 1, espacio entre hileras (Sh) 0,8 m, espacio entre plantas (Sp) 0,3 m, diámetro de copa (Dc) 0,2 m.

Keller (1964), de acuerdo a las características del clima humedo, textura media y profundidad radicular menor 75 cm (Cuadro 4), La eficiencia de aplicación (Ea) es 0,85.

Butron C. (2017), indica que la Evapotranspiración de referencia (Eto) para el mes de marzo es 1,95 mm/día en el invernadero.

Con toda esta información se realizó los cálculos del diseño agronómico comparando el procedimiento con lavado de sales y sin lavado de sales.

La recolección de los datos necesarios para el cálculo del diseño hidráulico se realizó las mediciones de un sistema de riego por goteo existente en el invernadero de la estación experimental de Cota Cota, para luego hacer dos comparaciones incorporando la ecuación de Pouseuille para cálculo de la viscosidad cinemática del agua según la temperatura (ecuación (28)), con la viscosidad cinemática obtenida en tablas en relación a la temperatura del agua.

La elaboración del programa se lo realizo según los pasos recomendados por Ríos (2014). Para esto se revisó la metodología de Chipana, Agronayade, Chow, Veintimilla y Serrano, para los cálculos del diseño agronómico e hidráulico en el sistema de riego por goteo, donde se seleccionó el procedimiento de Serrano (2015) por adecuarse a los problemas actuales en el riego por goteo, considerando lo siguiente en el diseño agronómico e hidráulico:

#### **4.4.1. Diseño agronómico**

Requerimiento de lavado de sales (ecuación (3)) mediante este cálculo se estima la infiltración de las sales existentes en el suelo y en el agua de riego a profundidades del suelo que no afecten el rendimiento del cultivo, para lo cual se tendrá un incremento de la lámina bruta (Zb), el tiempo de riego (Tr) y el caudal del diseño.

Eficiencia de aplicación, Keller (2014), indica que este parámetro varía según el clima, textura y la profundidad radicular del cultivo (Cuadro 4), el cual es un dato importante para la determinación de Zb.

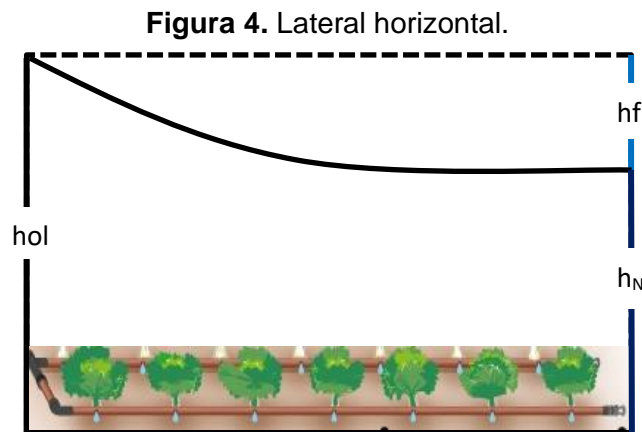


#### 4.4.2. Diseño hidráulico

Serrano (2018), indica que en el proceso del análisis del diseño hidráulico se debe analizar tres casos tomando en cuenta que la diferencia de presión de trabajo no debe superar el 20% de la presión nominal ( $h_N$ ).

##### 4.4.2.1. Lateral horizontal

El valor de variación de carga permitida  $|\Delta h_a|$  será la máxima pérdida de carga admitida, respecto al cual se irán probando los distintos diámetros de tubería hasta que la pérdida de carga reducida ( $h_{fr}$ ) sea menor o igual a nueva variación de carga permitida ( $|\Delta H_a|$ ). Presión al inicio del lateral ( $h_{ol}$ ).



**Fuente:** Elaboración propia (2019).

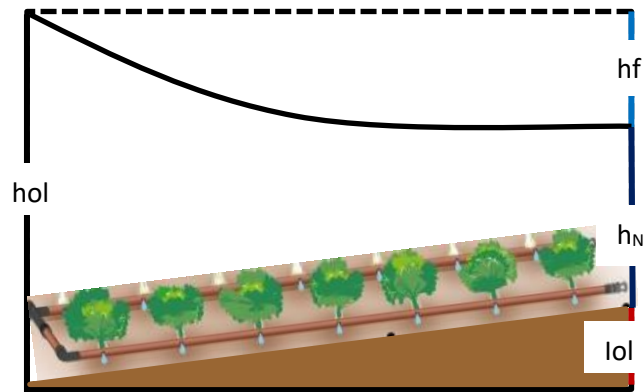
$$h_{ol} = h_N + h_f \quad (20)$$

$$\Delta h_a = h_{ol} - h_N \quad (21)$$

$$h_{fr} \leq \Delta h_a$$

##### 4.4.2.2. Lateral ascendente

Cuando altura de pendiente ( $l_{ol}$ ) se aproxime a  $|\Delta h_a|$  será necesario cambiar el trazado o emplear reguladores de presión en los emisores (goteros autocompensantes).

**Figura 5. Lateral ascendente.**

Fuente: Elaboración propia (2019).

$$h_{ol} = h_N + h_f + I_{ol} \quad (22)$$

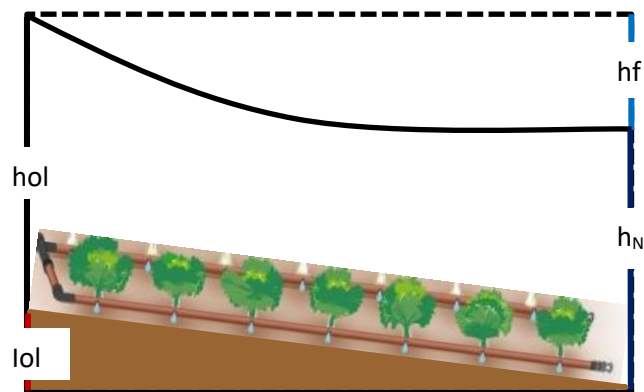
$$\Delta h_a = h_{ol} - h_N$$

$$\Delta H_a = \Delta h_a - I_{ol} \quad (23)$$

$$h_{fr} \leq \Delta H_a$$

#### 4.4.2.3. Lateral descendente

Cuando  $I_{ol}$ , es similar o igual a  $|\Delta h_a|$ , las presiones resultan casi uniformes en todo el ramal, sería un caso ideal sin necesidad de reguladores de presión ( $I_{ol} < h_f$ ).

**Figura 6. Lateral descendente.**

Fuente: Elaboración propia (2019).

$$h_{ol} = h_N + h_f - I_{ol} \quad (24)$$

$$\Delta h_a = h_{ol} - h_N$$

$$\Delta H_a = \Delta h_a + I_{ol} \quad (25)$$

$$h_{fr} \leq \Delta H_a \quad (26)$$

Con esta metodología recomendada por Serrano (2018), el diseño hidráulico se adecuaría a cualquier situación de pendiente por lo cual Serrano recomienda el uso de goteros autocompensantes porque se adecuan a estos requerimientos.

#### 4.4.2.4. Viscosidad cinemática del agua

La viscosidad es una manifestación del movimiento molecular dentro del fluido las moléculas con alta velocidad chocan con las de una velocidad menor, y viceversa, es decir que, a mayor temperatura, debería disminuir la viscosidad y aumentaría la velocidad por el incremento de la temperatura serian directamente proporcionales, (Quinde, 2014).

Quinde (2014), Indica que existen varias fórmulas que permiten evaluar la variación de la viscosidad en relación a la temperatura entre las más importantes tenemos la ecuación de Arrhenius, Williams Landel-Ferry, Van Velzen y la ecuación de Poiseuille ecuación formula que se usó dentro del programa con relación a la temperatura:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha T + \beta T^2} \quad (27)$$

Dónde:

$\mu_0$ : Viscosidad dinámica a 0°C.

T: Temperatura en °C.

$\alpha, \beta$ : Coeficientes constantes.

Serrano (2018), recomienda usar la siguiente relación para hallar la viscosidad cinemática:

$$v = \frac{\mu_0}{1 + \alpha T + \beta T^2} * \frac{g}{\gamma} \quad (28)$$

Dónde:

u: Viscosidad cinemática.

$\alpha$  0,337

$\beta$  0,00022

- g: Gravedad.  
 $\gamma$ : Peso específico del agua.

Tarjuelo (2010), menciona que en el caso de los emisores de recorrido largo y de régimen laminar, el caudal varía debido al impacto de la temperatura sobre la viscosidad del agua, los efectos de la temperatura pueden ser significativos para tuberías de PE expuestas al sol alcanzando temperaturas muy por encima de 20 °C, casos en que no se debe recurrir a los emisores de régimen laminar.

La viscosidad cinemática es considerada dentro de las fórmulas de Blasius (15) y Colebrook (13), para el cálculo de  $f$  necesaria en la ecuación de Darcy Weisbach (12), por ser una ecuación implícita lo cual dificulta su cálculo debido a dos incógnitas diámetro y factor de fricción ( $D$ ,  $f$ ) para este procedimiento Serrano (2018), recomienda el método de Newton Raphson para el cálculo del diámetro sin  $f$  en la siguiente expresión:

$$1) \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log\left(\frac{\varepsilon}{3,71 * D} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}}\right)$$

$$2) hf = f * \frac{L * V^2}{D * 2 * g}$$

$$3) Re = \frac{V * D}{\nu} \rightarrow V = \frac{Re * \nu}{D}$$

3) en 2) eliminando  $V$ :

$$4) Re * \sqrt{f} = \frac{D^{3/2}}{\nu} * \sqrt{\frac{2 * g * hf}{L}}$$

De 2) explicitamos

$$5) \frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{V}{\sqrt{D}} * \sqrt{\frac{L}{2 * g * hf}}$$

Ahora sustituyendo 5) y 4) en 1)

$$6) \frac{V}{\sqrt{D}} * \sqrt{\frac{L}{2 * g * hf}} = -2 \log\left(\frac{\varepsilon}{3,71 * D} + \frac{2,51}{\frac{D^{3/2}}{\nu} * \sqrt{\frac{2 * g * hf}{L}}}\right)$$

Como:

$$7) V = \frac{4 * Q}{\pi * D^2}$$

$$8) \frac{4 * Q}{\pi * D^2 \sqrt{D}} = -2 \sqrt{\frac{2 * g * hf}{L}} * \log\left(\frac{\varepsilon}{3,71 * D} + \frac{2,51 * v}{D^{3/2} * \sqrt{\frac{2 * g * hf}{L}}}\right)$$

Explicitando D

$$D = \left(-\frac{\pi}{2 * Q} * \sqrt{\frac{2 * g * hf}{L}} * \log\left(\frac{\varepsilon}{3,71 * D} + \frac{2,51 * v}{D^{3/2} * \sqrt{\frac{2 * g * hf}{L}}}\right)\right)^{-2/5}$$

Simplificando:

$$A = \frac{\pi}{2 * Q} * \sqrt{\frac{2 * g * hf}{L}}$$

$$B = \frac{\varepsilon}{3,71}$$

$$C = \frac{2,51 * v}{\sqrt{\frac{2 * g * hf}{L}}}$$

$$E = \sqrt{\frac{2 * g * hf}{L}}$$

Sustituyendo:

$$D = \left(-A * \log\left(\frac{B}{D} + \frac{C}{D^{3/2}}\right)\right)^{-2/5} \quad (29)$$

Con la metodología de Newton Raphson se podrá calcular el diámetro partiendo con un valor inicial, este procedimiento terminará hasta que exista una igualdad en ambos extremos.

En tuberías de PVC, comúnmente no es conveniente que las velocidades superen 3 m/s para no comprometer un desgaste rápido debido a la fricción que ocasionan las partículas en suspensión hacia las paredes de la tubería. Por lo contrario, no deben admitirse valores menores o iguales 0,3 m/s para evitar la sedimentación y posterior acumulación de depósitos de arena en las tuberías. Serrano (2015).

**Cuadro 6.** Velocidad máxima en función del diámetro interno.

Diámetro Int. (mm)	≤100	≤125	≤150	≤200	≤250	≤300	≤350	≤350	≤400	≤450	≤500	≤600
Velocidad Max. (m/s)	1,80	1,85	1,95	2,05	2,15	2,25	2,30	2,50	2,85	2,85	3,10	3,10

Fuente: Clement Galant (1986).

#### 4.4.3. Diseño del programa

Con todas estas consideraciones se procedió a realizar los diagramas de flujo para lo cual se usó Microsoft Visio, para el diseño agronómico e hidráulico en el sistema de riego por goteo, para luego codificarla en la plataforma de Visual Studio, con la siguiente descripción para su elaboración.

##### 4.4.3.1. Representación conceptual del programa

###### Diseño agronómico

Para la elaboración del programa (Figura 8), se consideró el criterio de Keller (2014), (Cuadro 4), para la Ea con relación al **clima**: húmedo o árido, **textura**: gruesa, media o fina descartando la textura gravosa por no ser apta para la siembra, y la **profundidad radicular** de: “< 75 cm”, “75 a 150 cm” o “> 150 cm”. Seleccionando la Ea que se usara dentro del diseño.

Se añadió los datos de las propiedades hidrofísicas del suelo (Cuadro 7) de acuerdo a las 12 clases texturales del suelo, para su selección con sus respectivos datos promedios de humedad a capacidad de campo (Ucc), humedad a punto de marchitez permanente (Upmp), densidad aparente (Dap), infiltración básica del suelo (Ib), y eficiencia de lavado de sales (efl). Si estos valores fueran obtenidos por pruebas de laboratorio de acuerdo a las muestras tomadas del lugar donde se implementará el sistema de riego por goteo, el programa habilita la opción de poder introducir las al seleccionar la opción “usuario” el cual permite hacer uso de estos datos dentro del programa.

**Cuadro 7.** Propiedades hidrofísicas del suelo.

Textura	Ucc (%)	Upmp (%)	Dap (gr/cc)	lb (cm/hr)	efl
A	7,01	3,51	1,71	9	0,9
AF	9,2	4,91	1,63	4,5	0,9
FA	13,46	6,41	1,56	3	0,9
F	21,27	10,64	1,41	1,5	0,9
FL	23,07	9,09	1,43	1,4	0,7
L	21,05	5,92	1,52	1,15	0,7
FYA	22,14	14,29	1,4	2,5	0,7
FY	28,78	16,67	1,32	1,25	0,7
FYL	33,85	18,11	1,27	0,75	0,5
YA	28,35	20,15	1,34	1,65	0,5
YL	40,49	25,62	1,21	0,5	0,5
Y	42,5	30,83	1,2	0,15	0,5

Fuente: Citado por Serrano (2015).

Se consideró el uso de emisores autocompensantes de tipo botón (Cuadro 8), del catálogo de Naandajain (2015), por adecuarse a cualquier variación de presión, los cuales están representados por un código de color (amarillo “2,00 l/hr”, negro “4,00 l/hr”, azul “8,00 l/hr”, verde “14,00 l/hr”.) en relación al caudal y la presión de servicio ha.

**Cuadro 8.** Goteros desarmables de tipo botón.

ha (bar)	2,00 l/hr	4,00 l/hr	8,00 l/hr	14,00 l/hr
0,5	1,40 l/hr	2,90 l/hr	5,70 l/hr	10,00 l/hr
1,0	2,00 l/hr	4,00 l/hr	8,00 l/hr	14,00 l/hr
1,5	2,40 l/hr	4,90 l/hr	9,70 l/hr	17,00 l/hr
2,0	2,80 l/hr	5,60 l/hr	11,20 l/hr	19,50 l/hr
2,5	3,10 l/hr	6,20 l/hr	12,40 l/hr	21,70 l/hr
3,0	3,40 l/hr	6,8 l/hr	13,60 l/hr	23,70 l/hr
3,5	3,60 l/hr	7,30 l/hr	14,60 l/hr	25,50 l/hr

Fuente: Catalogo de Naandanjain (2015).

Con todos estos datos incluidos dentro del programa, necesarios en el procedimiento del diseño agronómico en los siguientes cálculos:

- Agua disponible total (ADT)
- Lamina neta (Zn)
- Diámetro mojado (dm)
- Área mojada triangular (Ama)
- Área mojada circular (Amo)
- Numero de emisores (Ne)
- Área sombreada (A).
- Factor de cobertura. (Aljibury, Decroix, Hoare o Keller)
- Evapotranspiración del cultivo reducido (ETcr).
- Porcentaje de mojado mínimo (Pm).
- Lamina neta reducida (Znr).
- Frecuencia de riego (Fr).
- Requerimiento de lavado de sales (RL).
- Lamina neta corregida (Znc).
- Lamina bruta corregida (Zbc).
- Tiempo de riego (Tr).
- Caudal del diseño (Q).

La decisión del diseño agronómico se considerara de acuerdo a la siguiente relación: caudal disponible mayor o igual al caudal del diseño ( $Q_d \geq Q$ ), para esto se buscara la Fr que cumpla esta condición, para realizar todo esto se tomó en cuenta Fr como un intervalo de riego máximo así de esta manera se podrá seleccionar la Fr que cumpla esta condición, también se añadió un mensaje de ayuda si este valor fuera mayor a los 3 días lo cual es recomendado para el diseño agronómico.

### **Diseño hidráulico**

En esta metodología se seleccionó las ecuaciones de pérdida de carga (hf) de: Hazen Williams (14), Blasius (15) y Darcy Weisbach (12), considerando la ecuación de Poiseuille para el cálculo de la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) del agua en relación a la



temperatura del agua (28), dato necesario en las ecuaciones de Blasius y Colebrook White (13).

El valor de la pérdida de carga dependerá de la distribución del gasto  $Q_0$  a lo largo de la longitud  $L$  dividida en tramos, siendo la magnitud de gasto de cada uno de ellos acorde al gasto saliente, Christiansen propuso el factor reductor ( $F$ ) a las pérdidas de carga de acuerdo a la distancia de los emisores y laterales: distancia entera (17), distancia media (19) y distancia al inicio (18).

La variación de carga permitida ( $\Delta H_a$ ) es la máxima pérdida de carga permisible, de acuerdo al sentido de la pendiente: horizontal (21), ascendente (23) y descendente (25), para esto la pérdida de carga reducida ( $h_{fr}$ ) tiene que ser menor o igual a la pérdida de carga permisible ( $h_{fr} \leq \Delta H_a$ ).

Se debe buscar el diámetro comercial que cumpla la condición de variación de carga permitida  $h_{fr}$ , para este procedimiento se asume que la pérdida de carga reducida es igual a la nueva variación de carga permitida ( $h_{fr} = \Delta H_a$ ), para el cálculo del diámetro teórico y de esta manera buscar el diámetro comercial superior. Para hallar el diámetro teórico en la ecuación de Darcy Weisbach, se empleó la metodología de Newthom Raphson para el cálculo del diámetro sin  $f$  (ecuación (29), y así verificar nuevamente la variación de carga permitida introduciendo el diámetro comercial.

Se consideró los parámetros de velocidad máxima en función al diámetro (Cuadro 6) recomendadas por Clement (1986), para evitar el desgaste de tuberías para ello la velocidad calculada debe ser menor o igual a la velocidad máxima ( $v_l \leq v$ ).

### **Diseño de laterales**

El procedimiento para el diseño de laterales es el siguiente: (Figura 10)

- Presión mínima ( $h_m$ ).
- Variación de carga permitida ( $\Delta h_a$ ).
- Numero de emisores en el lateral ( $N_{el}$ ).

- Caudal en el lateral ( $Q_l$ ).
- Variación de carga permitida ( $\Delta h_l$ ).
- Factor reductor ( $F$ ).
- Nueva Variación de pérdida de carga permitida en el lateral ( $\Delta H_l$ ).
- Diámetro teórico ( $d_{tl}$ ).
- Velocidad en el lateral ( $V_l$ ).
- Perdida de carga en el lateral ( $h_{fl}$ ).
- Perdida de carga reducida en el lateral ( $h_{frl}$ ).
- Presión al inicio del lateral ( $h_{ol}$ ).

### **Diseño de las terciarias**

El procedimiento para el diseño de la terciarias es el siguiente: (Figura 11)

- Caudal en la terciaria ( $Q_t$ ).
- Variación de carga permitida en la terciaria ( $\Delta h_t$ ).
- Factor reductor ( $F$ ).
- Nueva variación de carga permitida en la terciaria ( $\Delta H_t$ ).
- Diámetro teórico para la terciaria ( $d_{tt}$ ).
- Velocidad en la terciaria ( $V_t$ ).
- Perdida de carga en la terciaria ( $h_{ft}$ ).
- Perdida de carga reducida en la terciaria ( $h_{ftr}$ ).
- Presión al inicio de la terciaria ( $h_{ot}$ ).

### **Diseño de la principal**

El procedimiento para el diseño de la principal es el siguiente (Figura 12).

- Velocidad en la principal ( $V_p$ ).
- Perdida de carga en la principal ( $h_{fp}$ ).
- Presión al inicio de la principal ( $h_{op}$ ).

### **Potencia de la bomba**

El procedimiento para el cálculo de la potencia de la bomba es el siguiente: (Figura 13)

- Presión total (ht).
- Presión manométrica (hman).
- Potencia de la bomba (Pot).

Con todo este procedimiento se realizó la programación en la plataforma de Visual Studio, añadiendo mensajes de ayuda (ToolTips) para identificar las variables al introducir los datos.

#### 4.5. Lista de símbolos diseño agronómico

Ea:	Eficiencia de aplicación.	ha:	Presión de servicio del gotero (bar).
Ucc:	Humedad a capacidad de campo (%).	Qe:	Caudal del emisor (lt/hr).
Upmp:	Humedad a punto de marchitez permanente (%).	Qd:	Caudal disponible (lt/hr).
Dap:	Densidad aparente (gr/cc).	ADT:	Agua disponible total (mm); (m <sup>3</sup> /ha).
Ib:	Infiltración básica (mm/hr).	Zn:	Lamina neta (mm); (m <sup>3</sup> /ha).
Efl:	Eficiencia de lavado.	dm:	Diámetro mojado (m).
Dw:	Densidad del agua (gr/cc).	Ama:	Área mojada rectangular (m <sup>2</sup> ).
Cew:	Conductividad eléctrica del agua (dS/m).	Amo:	Área mojada circular (m <sup>2</sup> ).
Pmi:	Porcentaje de mojado mínimo (%).	Ne:	Numero de emisores.
Etc:	Evapotranspiración del cultivo (mm/día).	A:	Fracción de área sombreada.
Sp:	Espacio entre plantas (m).	Kr:	Factor de cobertura.
Sh:	Espacio entre hileras (m).	ETcr:	Evapotranspiración del cultivo reducida (mm/día).
Dc:	Diámetro de copa (m).	Pm:	Porcentaje de mojado final (%).
Pr:	Profundidad radicular (m).	Znr:	Lamina neta corregida (mm).
f:	factor de agotamiento.	Fr:	Frecuencia de riego (día).
Cees:	Conductividad eléctrica del estrato de saturación (dS/m).	RL:	Requerimiento de Lavado.
At:	Área total de la parcela (m <sup>2</sup> ).	Znc:	Lamina neta corregida (mm).
		Zbc:	Lamina bruta corregida (mm).

Tr: Tiempo de riego (hr/día). Q: Caudal del diseño (lt/hr); (m<sup>3</sup>/hr); (lt/s).

#### 4.6. Lista de símbolos diseño hidráulico

m:	Exponente del caudal.	Dcl:	Diametro comercial del lateral (m); (mm).
ha:	Presion de servicio del emisor (m.c.a.).	V:	Velocidad (m/s).
Qe:	Caudal del emisor (lt/hr).	VI:	Velocidad en el lateral (m/s).
Ll:	Longitud del lateral (m).	hfl:	Perdida de carga en el lateral (m).
lol:	Altura de pendiente del lateral (m.c.a.).	hfrl:	Perdida de carga reducida en el lateral (m).
Ne:	Numero de emisores.	hol:	Altura al inicio del lateral (m).
x:	Exponente de descarga.	Lt:	longitud de la terciaria (m).
CU:	Coeficiente de uniformidad.	lot:	Altura de pendiente al inicio de la terciaria (m).
CV:	Coeficiente de variacion.	NI:	Numero de laterales.
Se:	Espacio entre emisores (m).	Nt:	Numero de emisores en la terciaria.
g:	Gravedad (m/s <sup>2</sup> ).	Sl:	Espacio entre laterales (m).
ε:	Rugosidad absoluta (m).	Qt:	Caudal en la terciaria (lt/hr); (m <sup>3</sup> /s).
C:	Coeficiente de rugosidad.	Δht:	Variacion de carga permitida en la terciaria (m).
hm:	Presion minima (m.c.a.).	Dtt:	Diametro teorico de la terciaria (m).
Nel:	Numero de emisores en el lateral.	Dct:	Diametro comercial de la terciaria (mm).
Ql:	Caudal en el lateral (lt/hr); (m <sup>3</sup> /s).	Vt:	Velocidad en la terciaria (m/s).
Δhl:	Maxima variacion de carga permitida en el lateral (m).	hft:	Perdida de carga en la terciaria (m).
F:	Factor de friccion.	hfrt:	Perdida de carga reducida en la terciaria (m).
ΔHl:	Nueva variacion de carga permitida en el lateral (m).	hot:	Altura al inicio de la principal (m).
T:	Temperatura (°C).	lop:	Altura de pendiente al inicio de la principal (m).
u:	Viscosidad cinemática (m <sup>2</sup> /s).	Lp:	Longitud de la principal (m).
Dtl:	Diametro teorico del lateral (m); (mm).	Dcp:	Diametro comercial de la principal (mm).
f:	Factor de friccion.		
NR:	Numero de Reynolds.		

Vp:	Velocidad de la principal (m/s).	Qp:	Caudal de la principal (m <sup>3</sup> /s).
hfp:	Perdida de carga en la principal (m).	hop:	Altura al inicio de la principal.
hop:	Altura al inicio de la principal (m).	Ht:	Altura total (m).
Hm:	Altura de succion (m).	hman:	Presion manometrica (m).
y:	Peso especifico del agua (kgf/m <sup>3</sup> ).	Pot:	Potencia de la bomba (kgf/m); (HP).
e:	Eficiencia de la bomba.		

Figura 7. Esquema del programa.

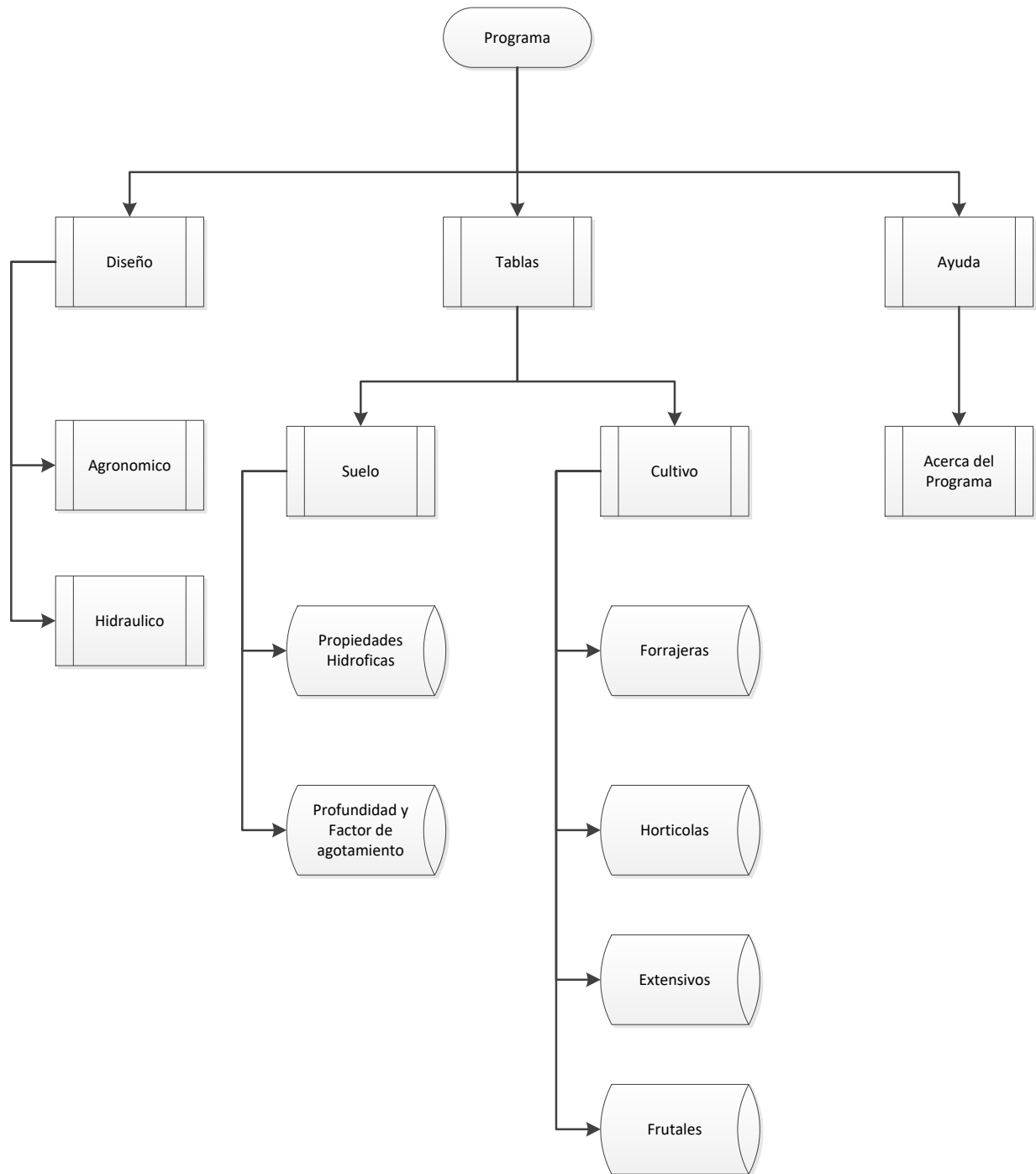


Figura 8. Diseño agronómico.

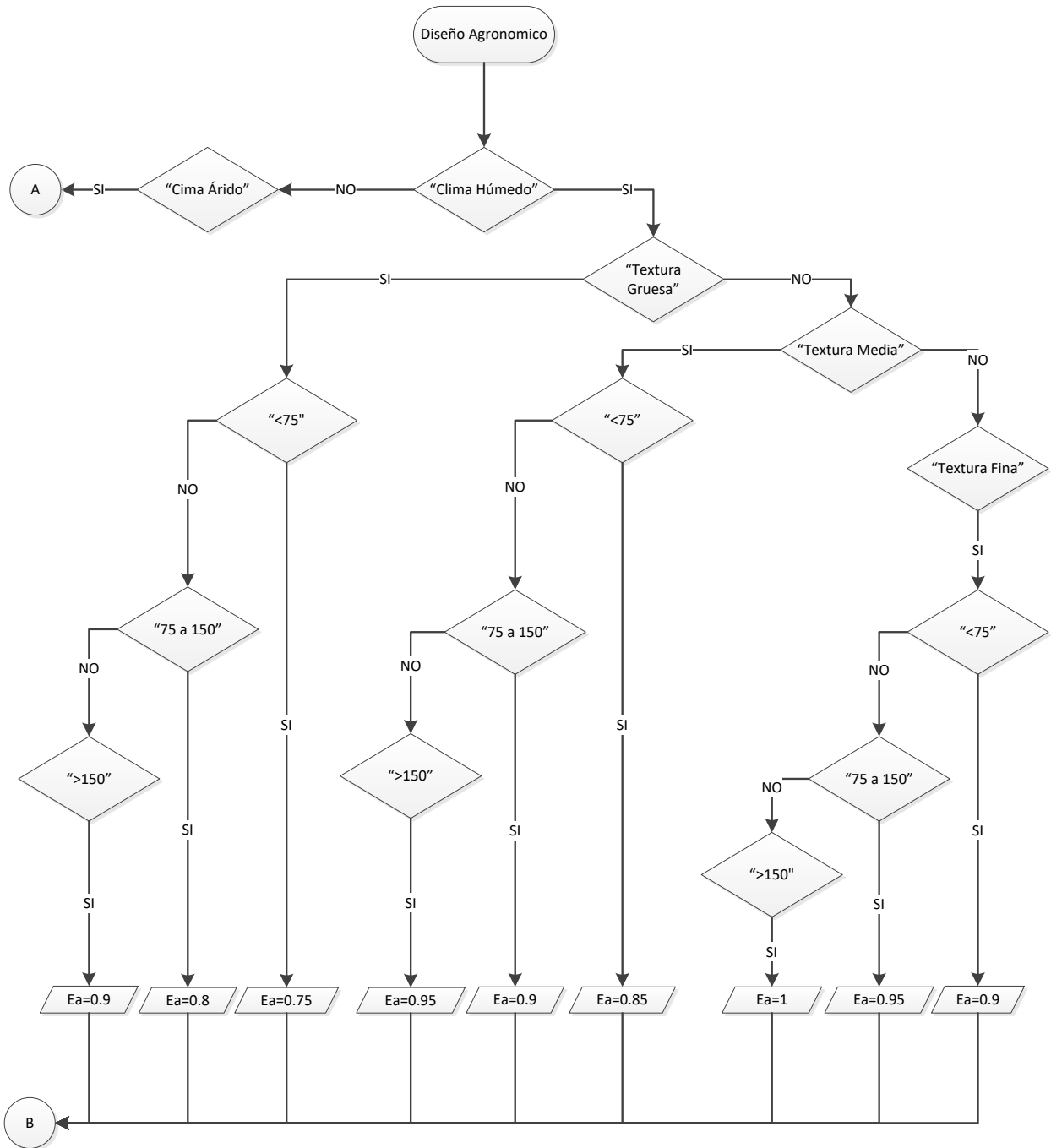


Figura 8. Diseño agronómico (Continuación).

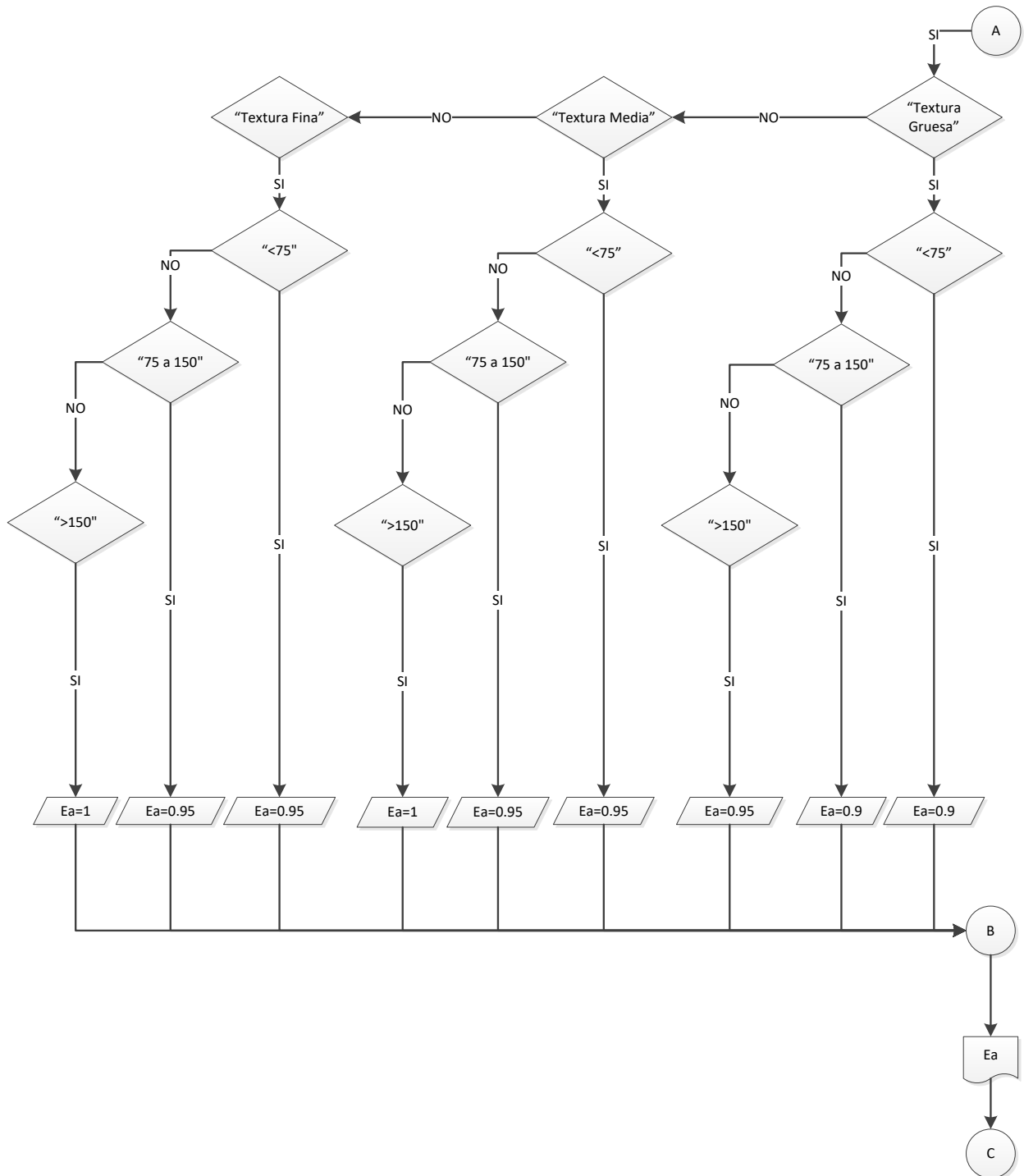




Figura 8. Diseño agronómico (Continuación).

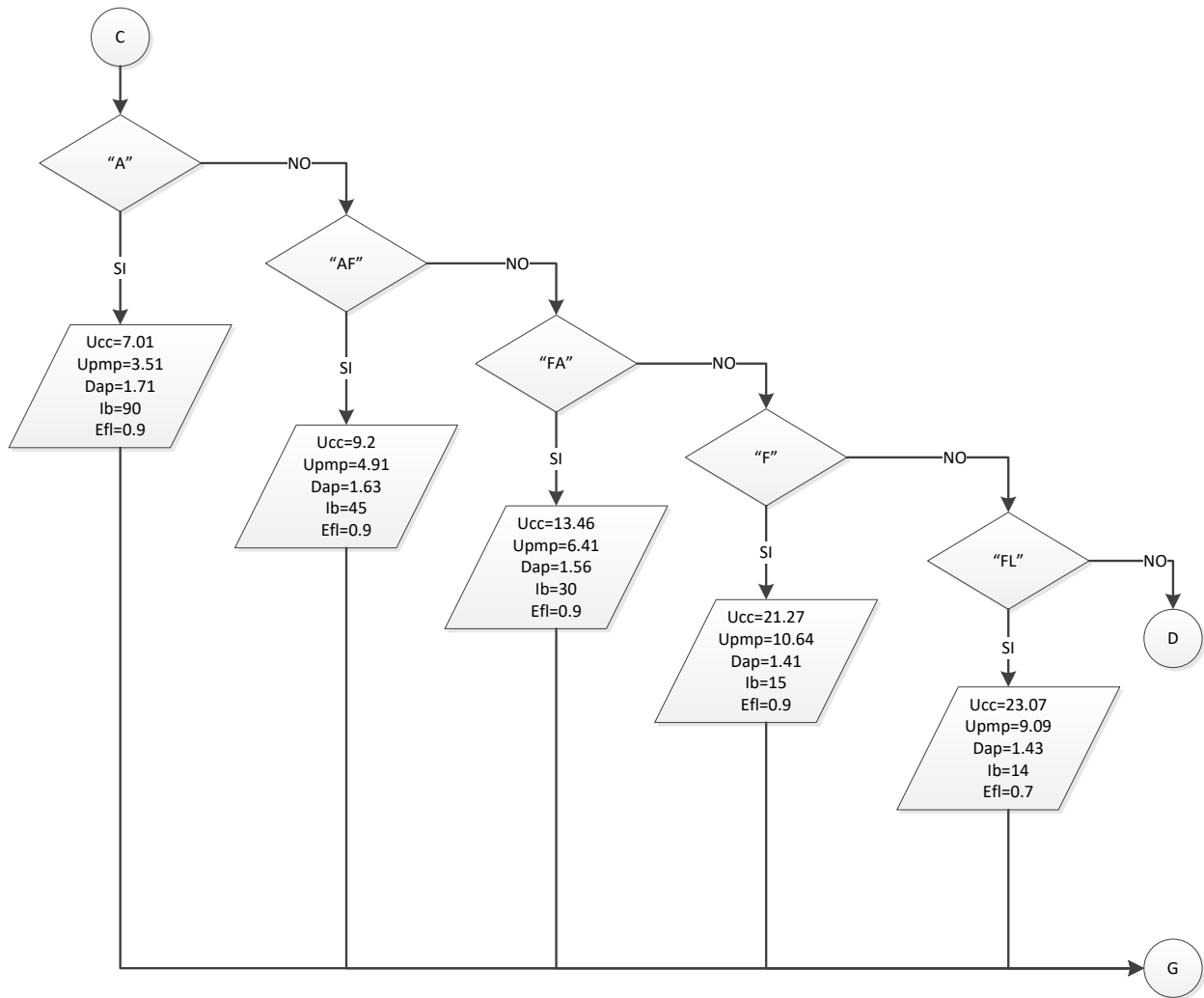


Figura 8. Diseño agronómico (Continuación).

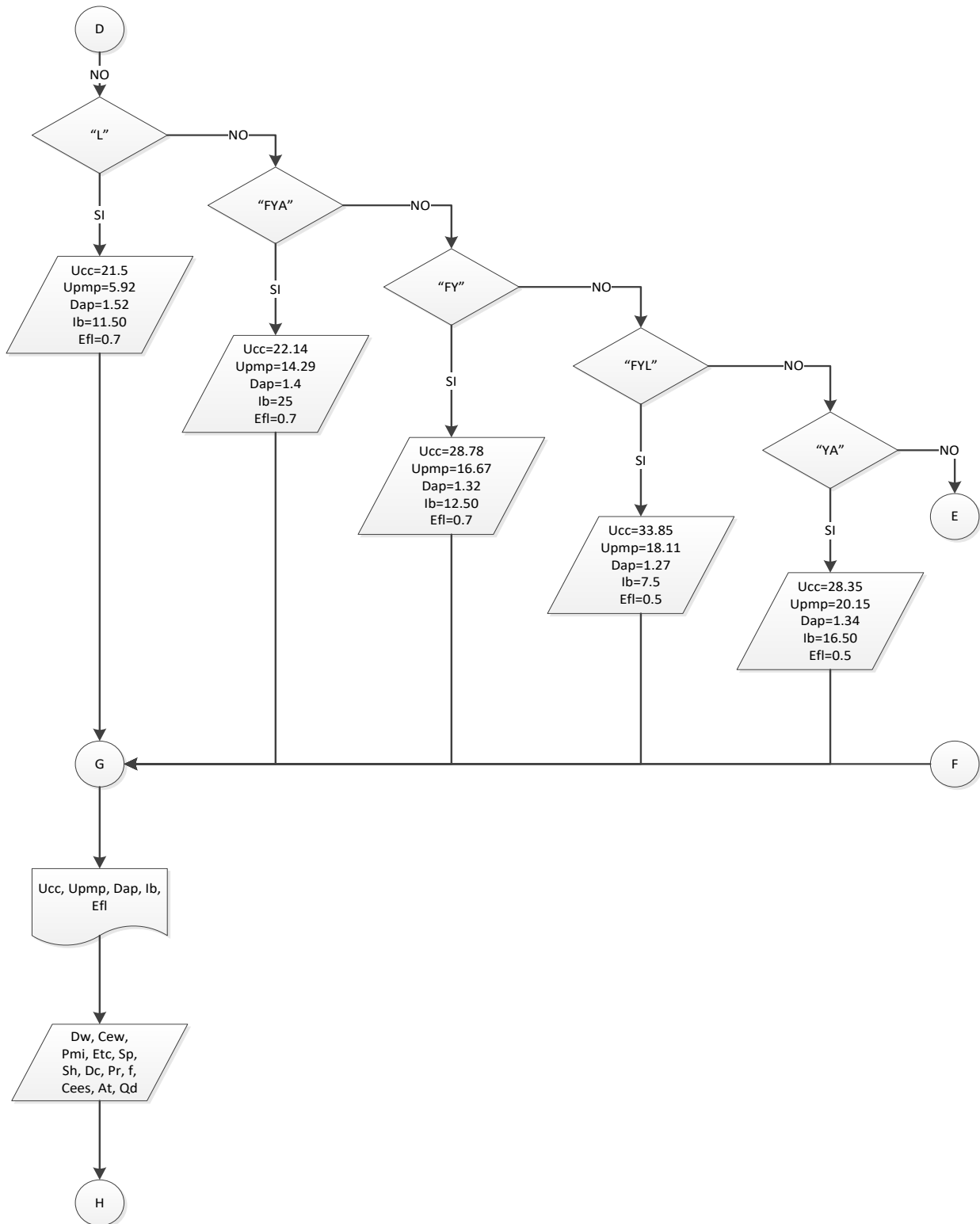


Figura 8. Diseño agronómico (Continuación).

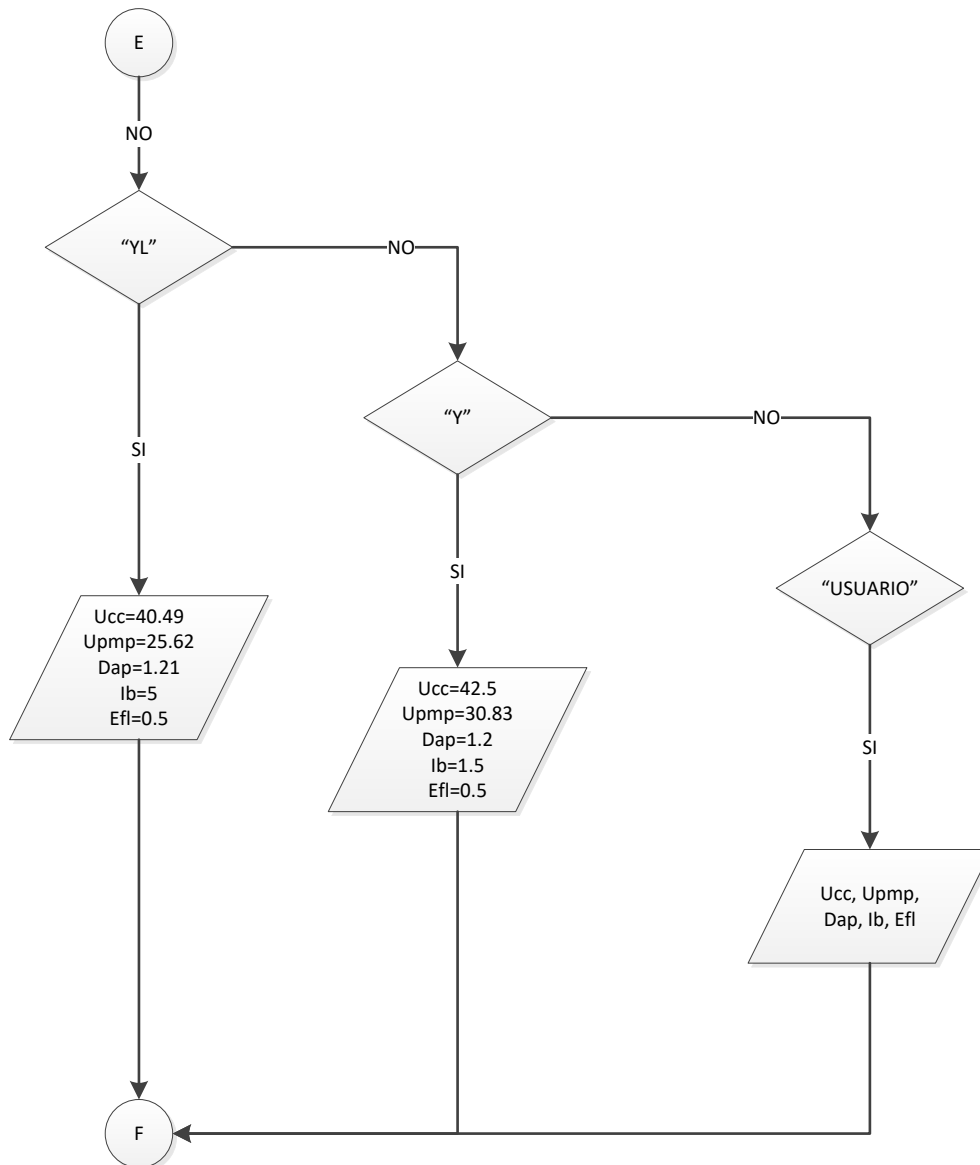


Figura 8. Diseño agronómico (Continuación).

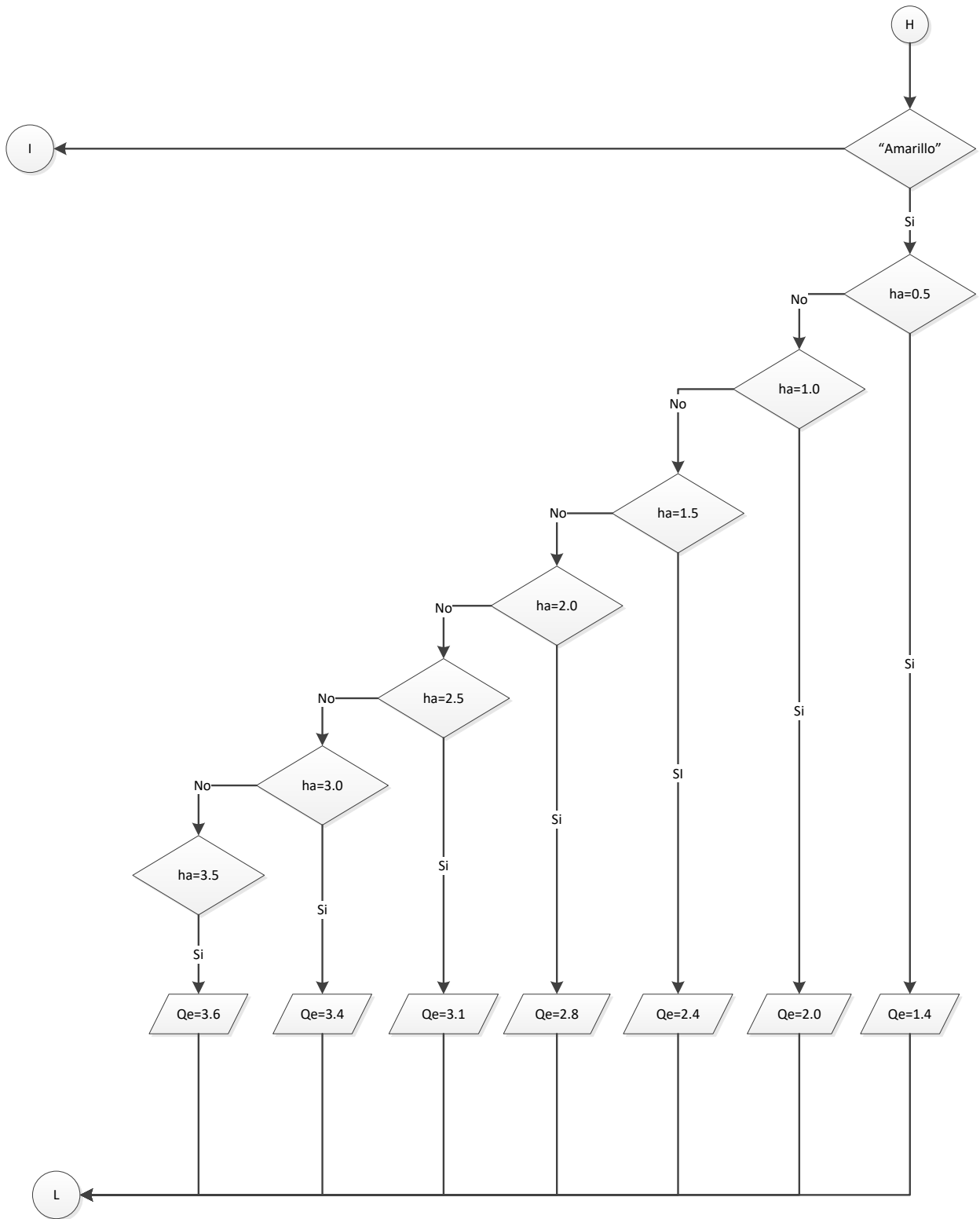


Figura 8. Diseño agronómico (Continuación).

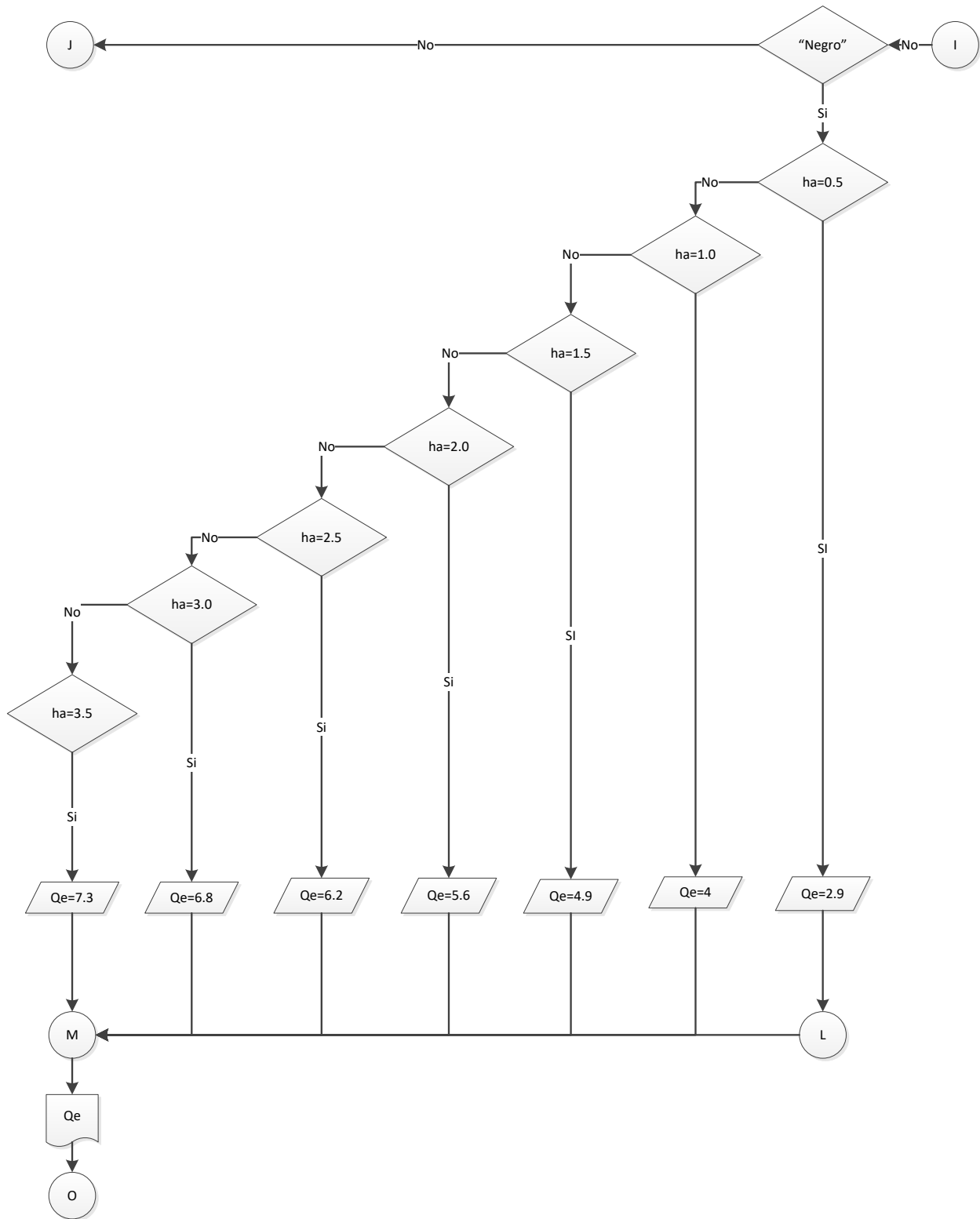


Figura 8. Diseño agronómico (Continuación).

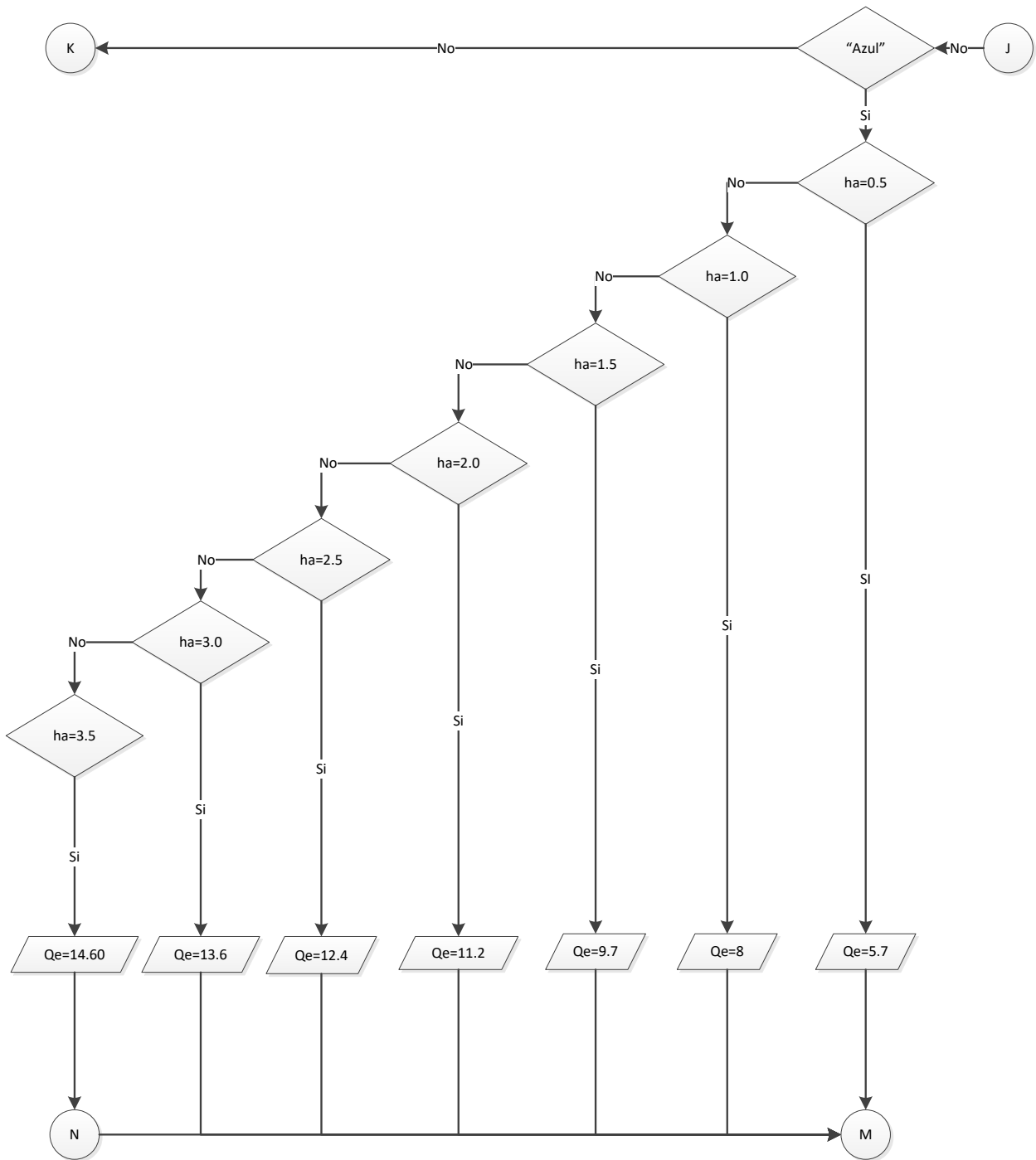


Figura 8. Diseño agronómico (Continuación).

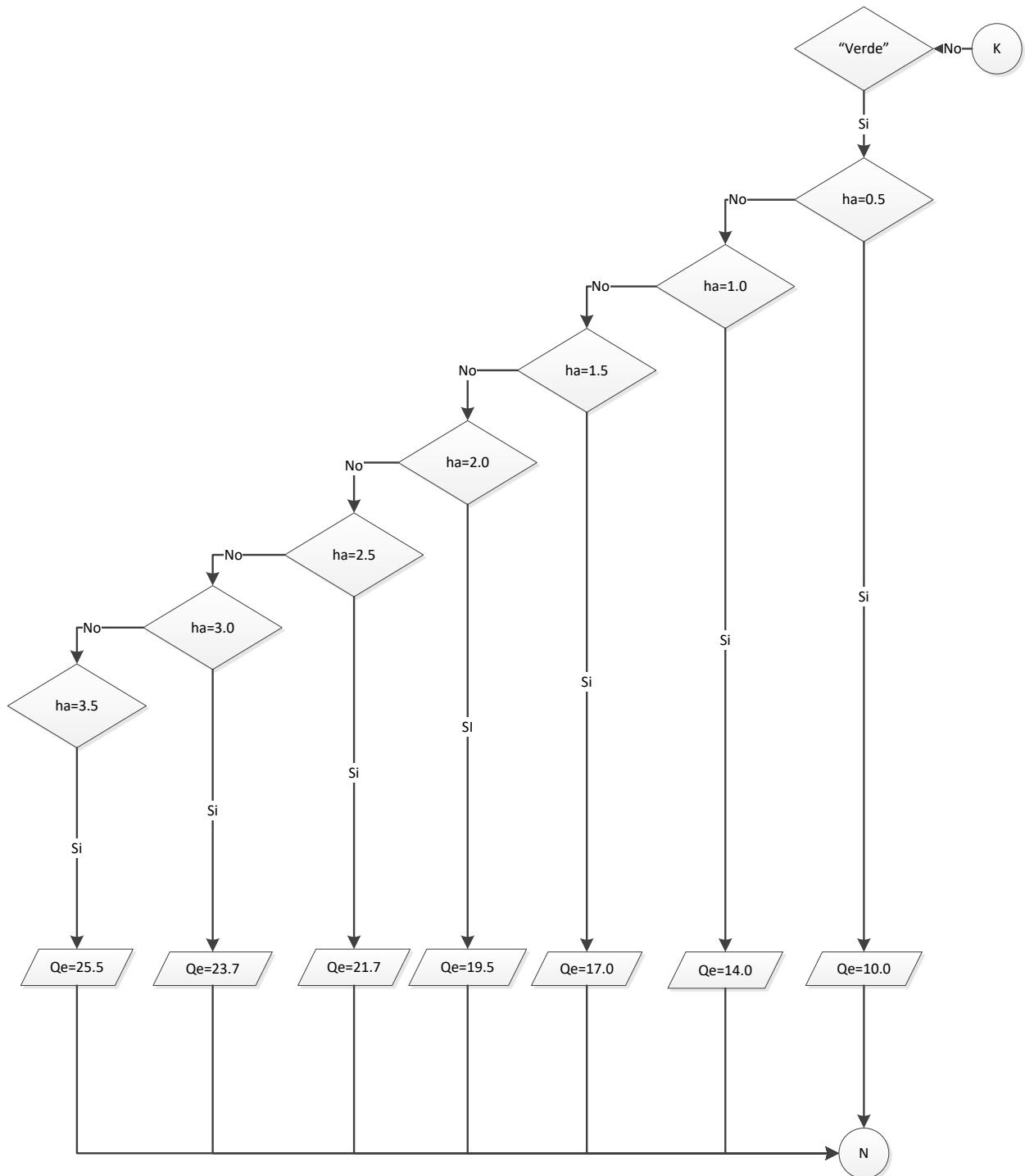
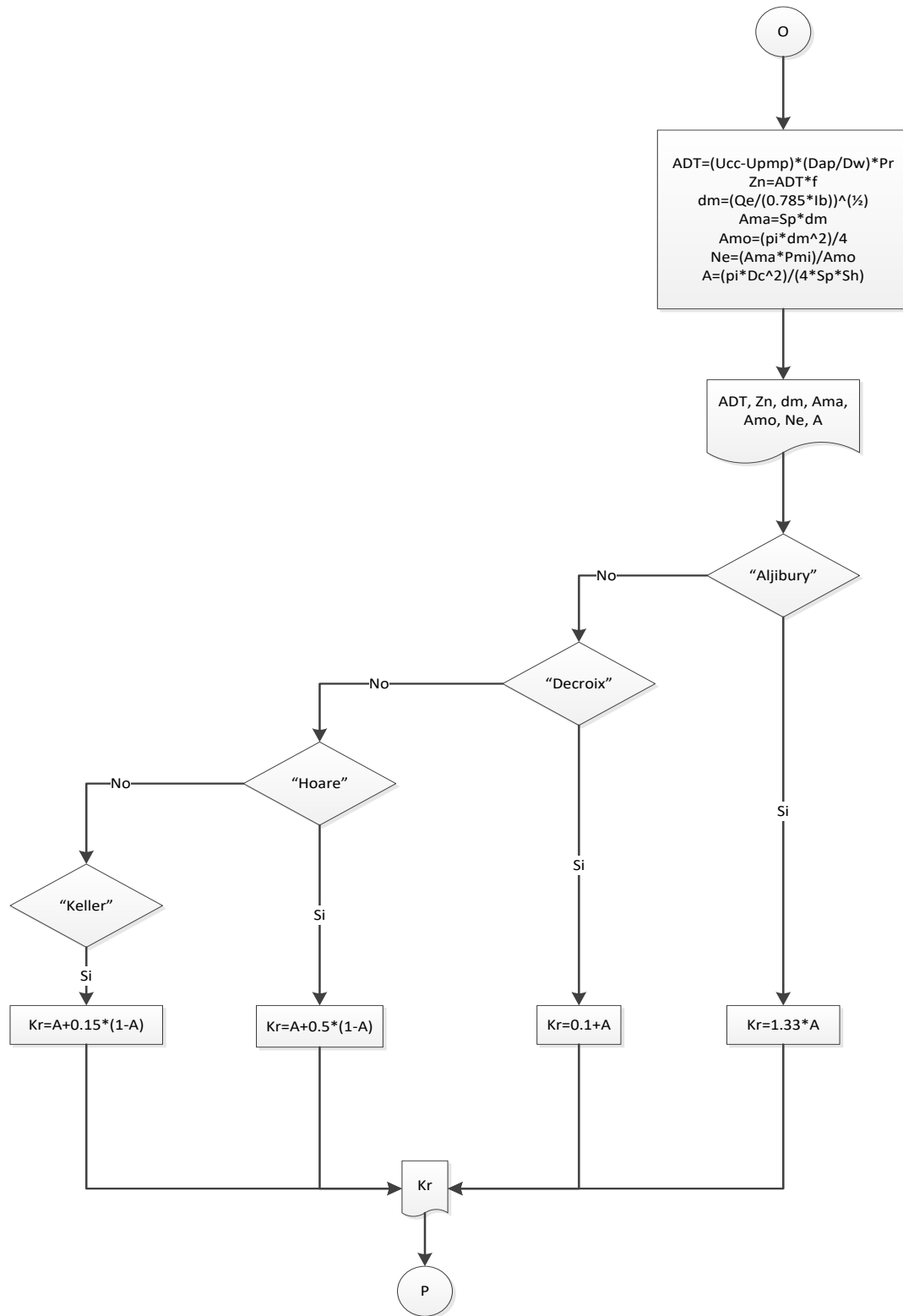
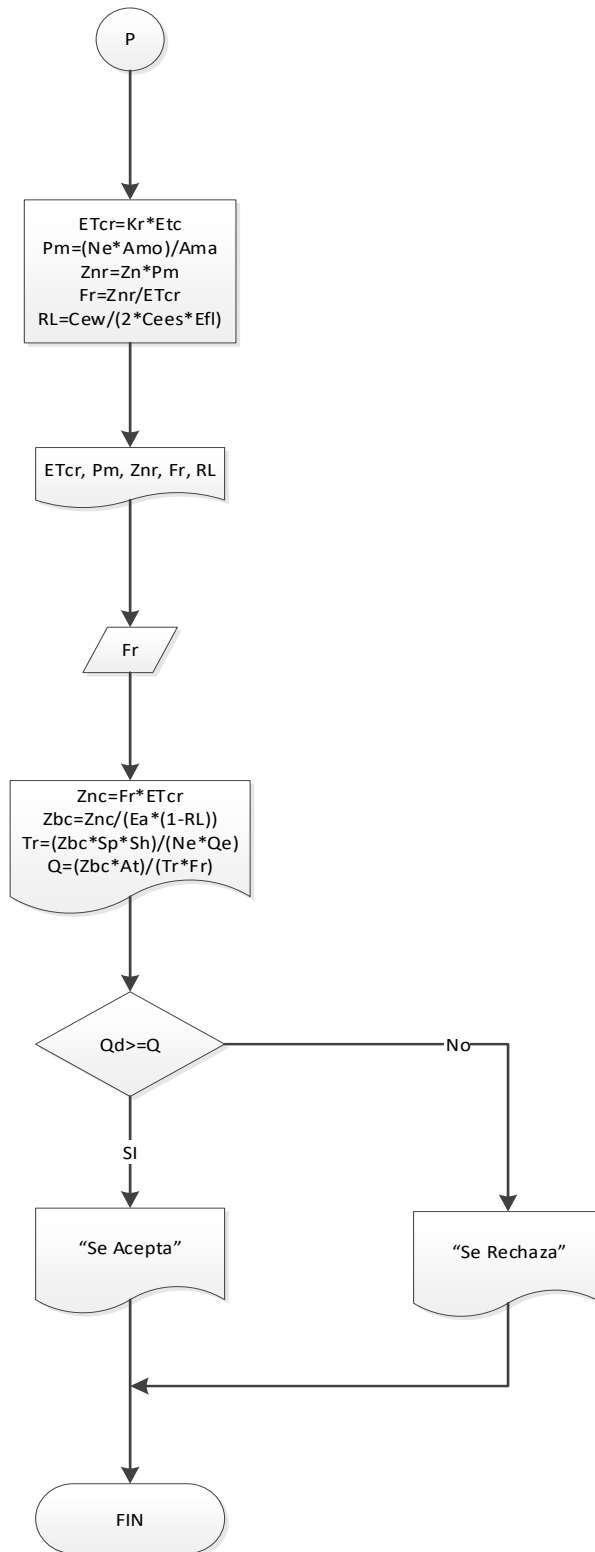


Figura 8. Diseño agronómico (Continuación).





**Figura 8.** Diseño agronómico (Continuación).

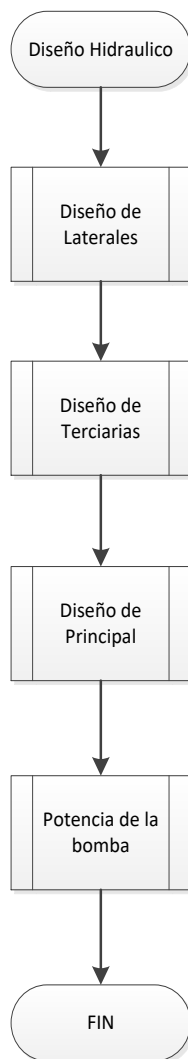
**Figura 9.** Diseño hidráulico.

Figura 10. Diseño de laterales.

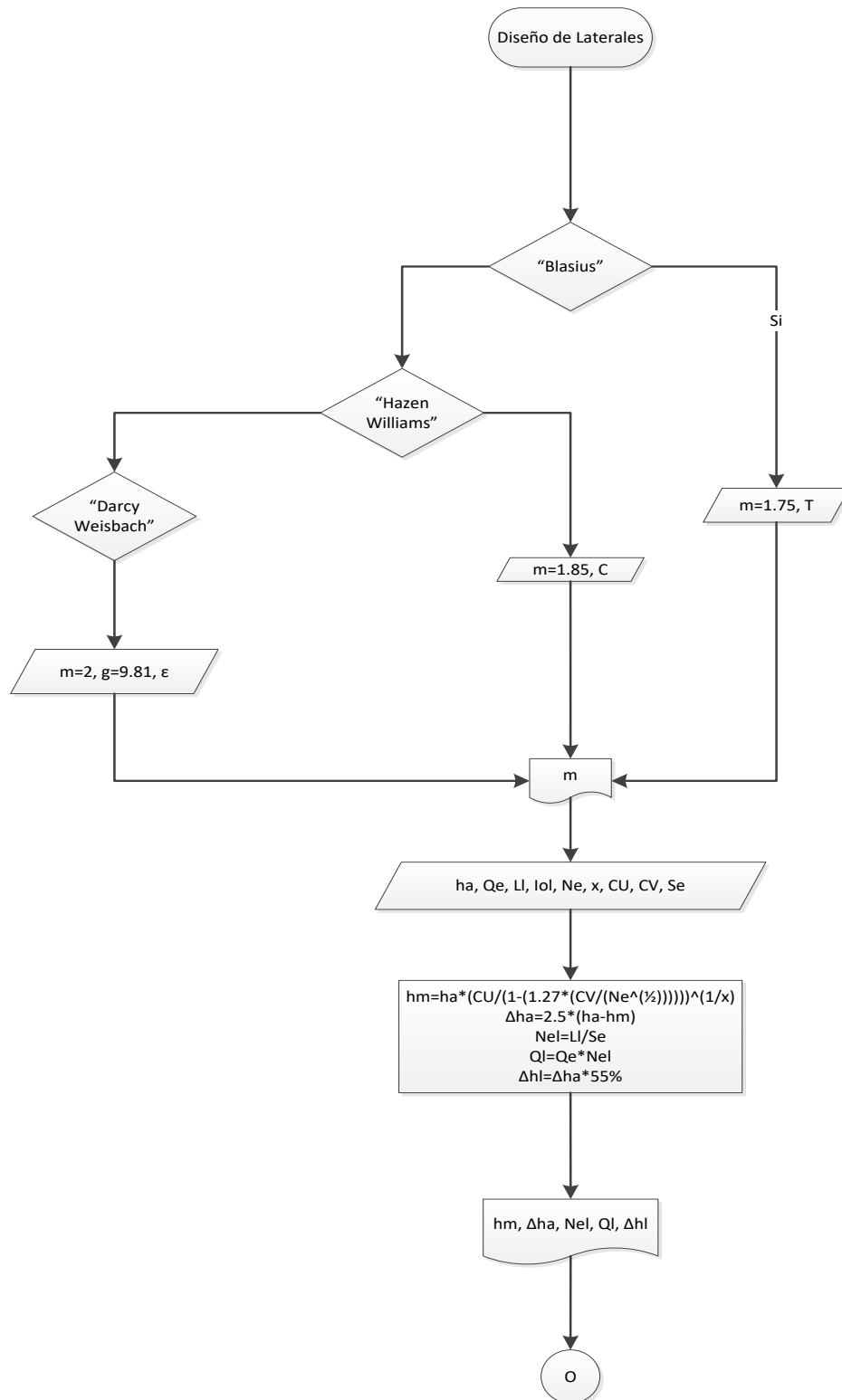


Figura 10. Diseño de laterales (Continuación).

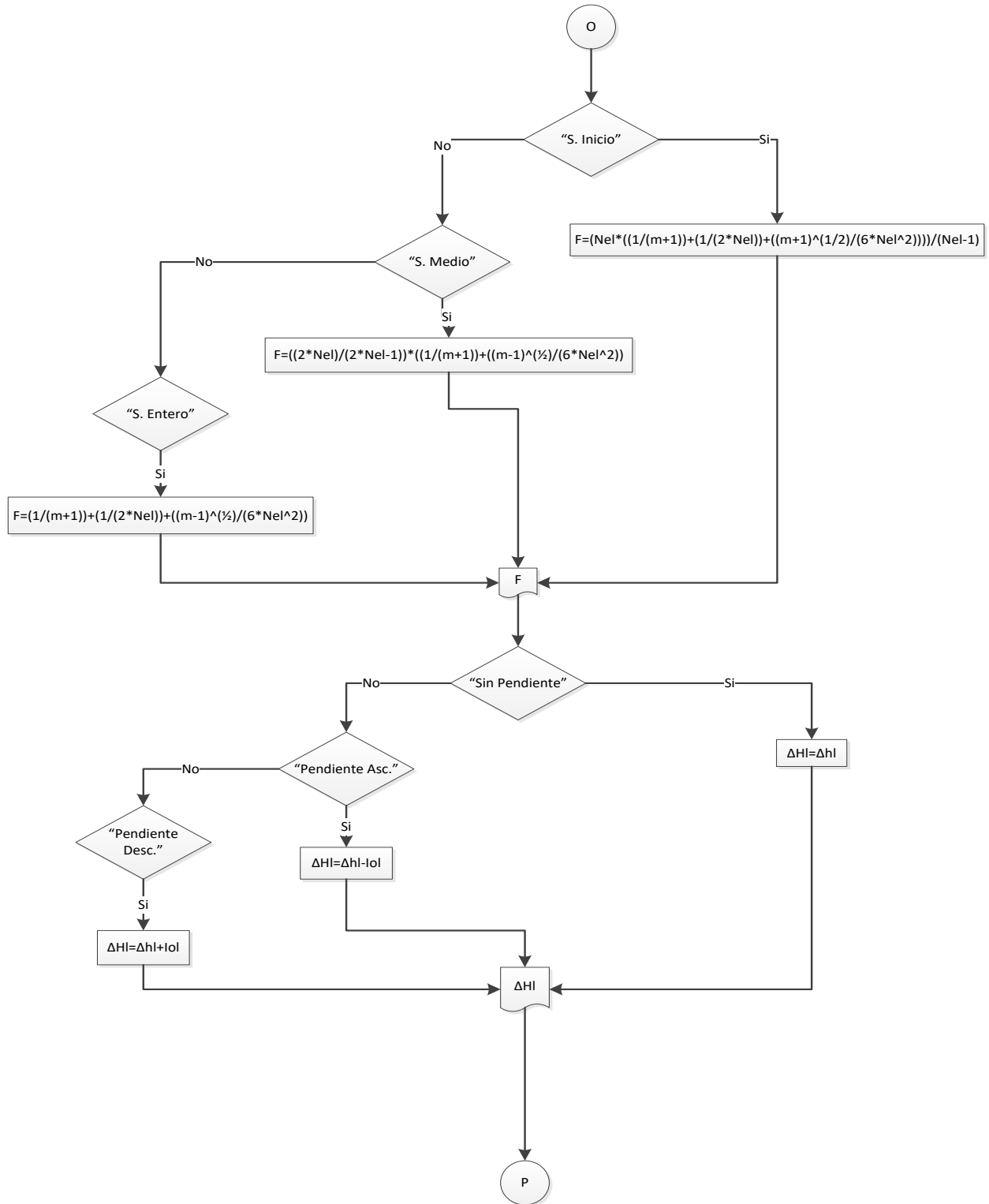
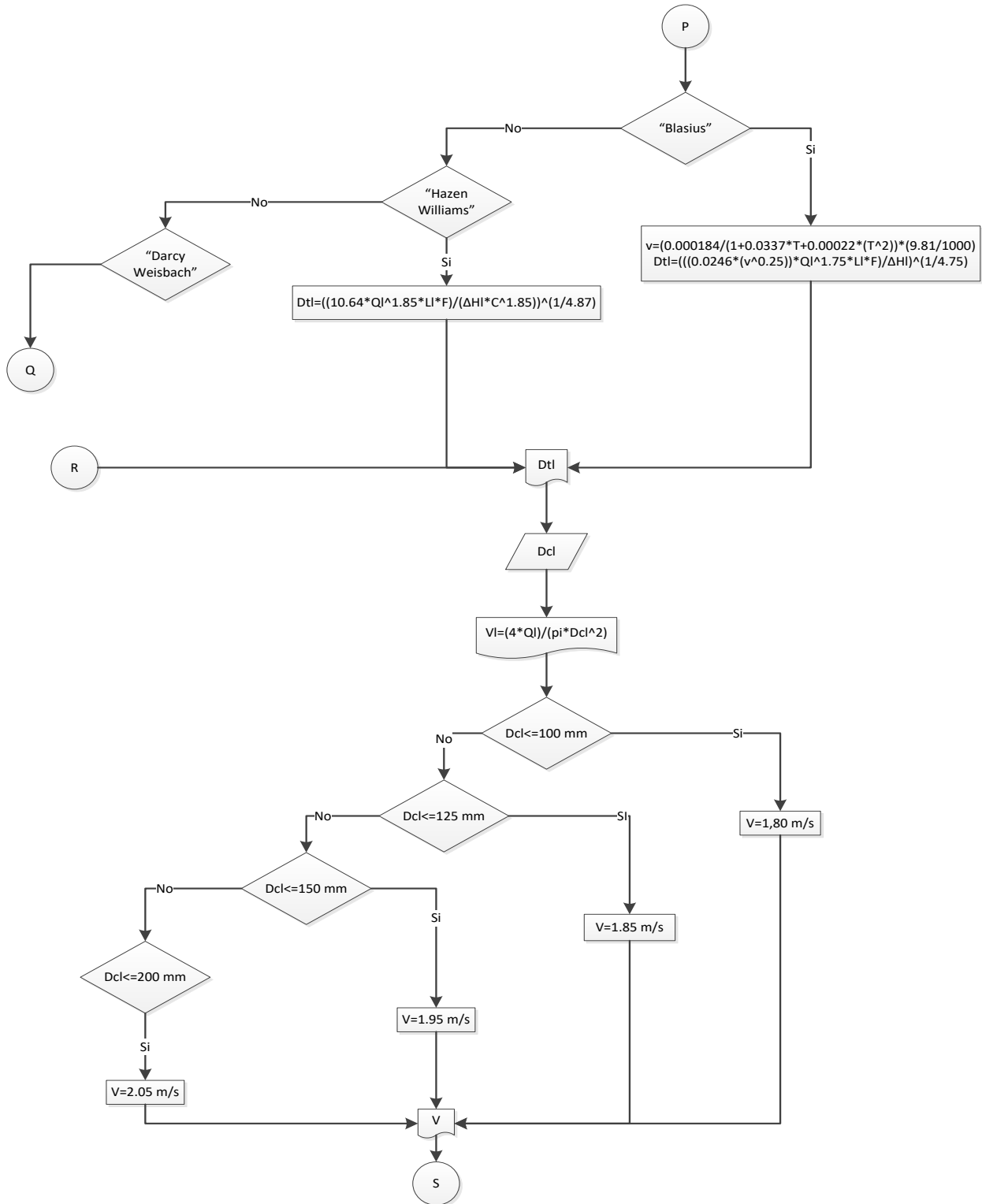


Figura 10. Diseño de laterales (Continuación).



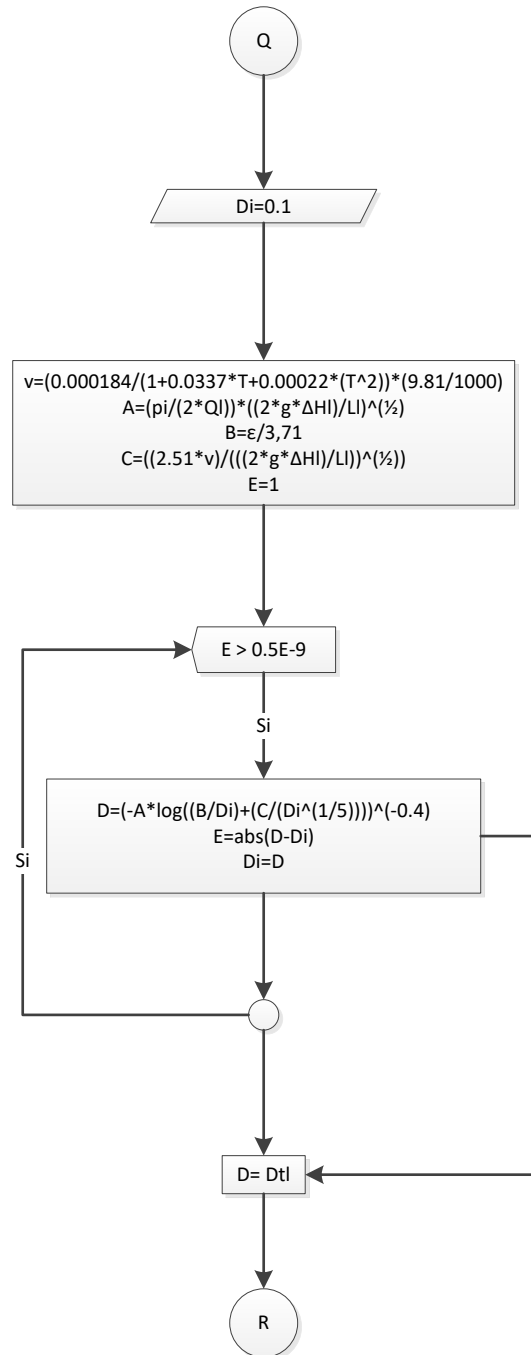
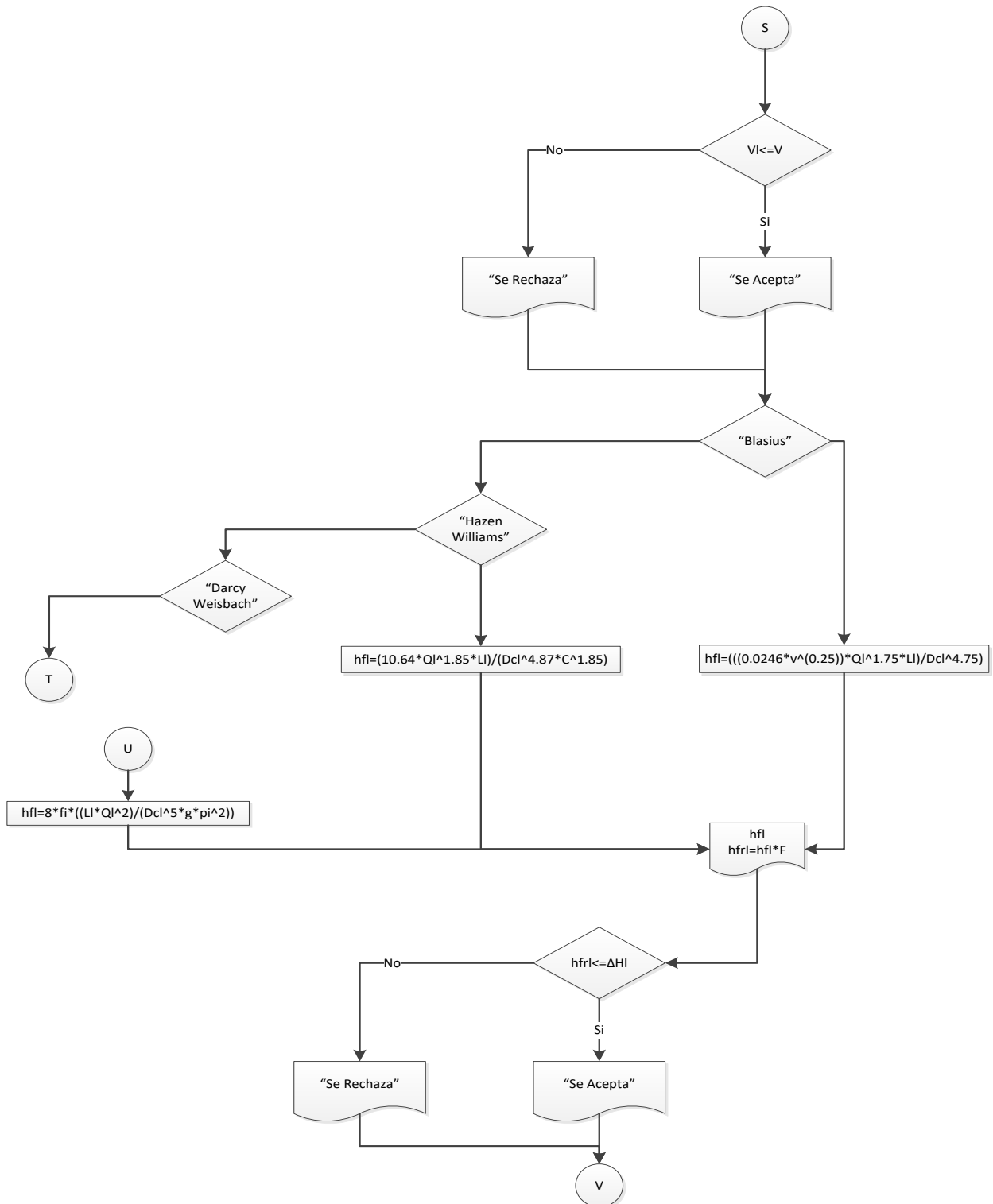
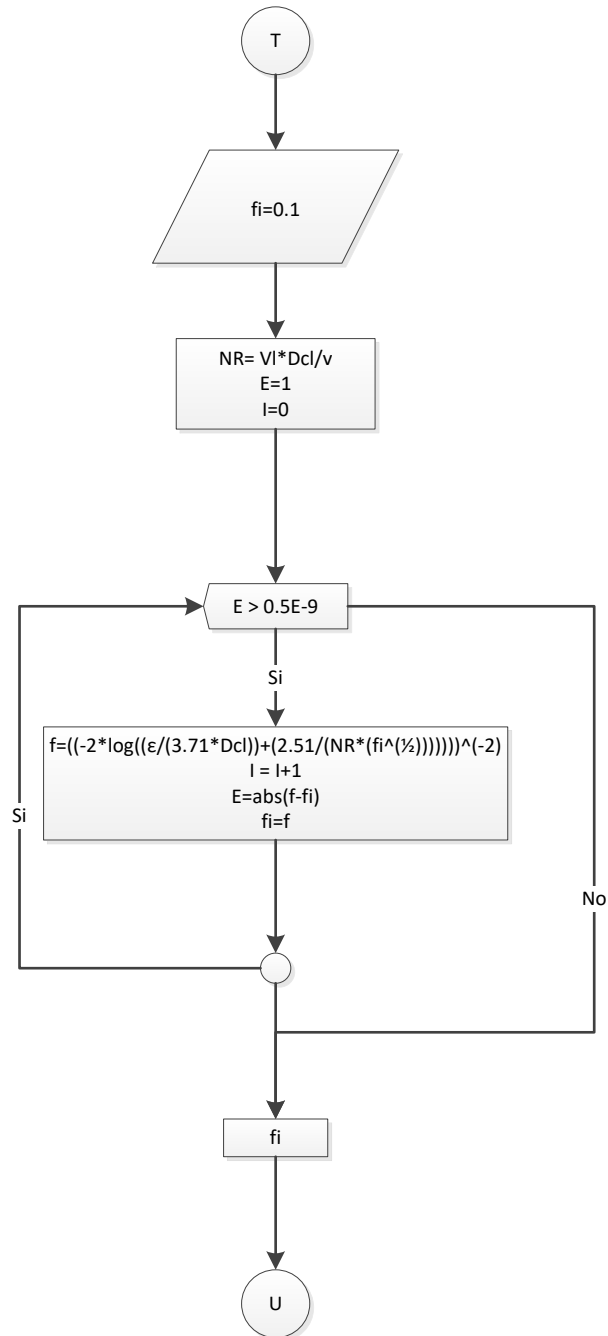
**Figura 10.** Diseño de laterales (Continuación).

Figura 10. Diseño de laterales (Continuación).



**Figura 10.** Diseño de laterales (Continuación).



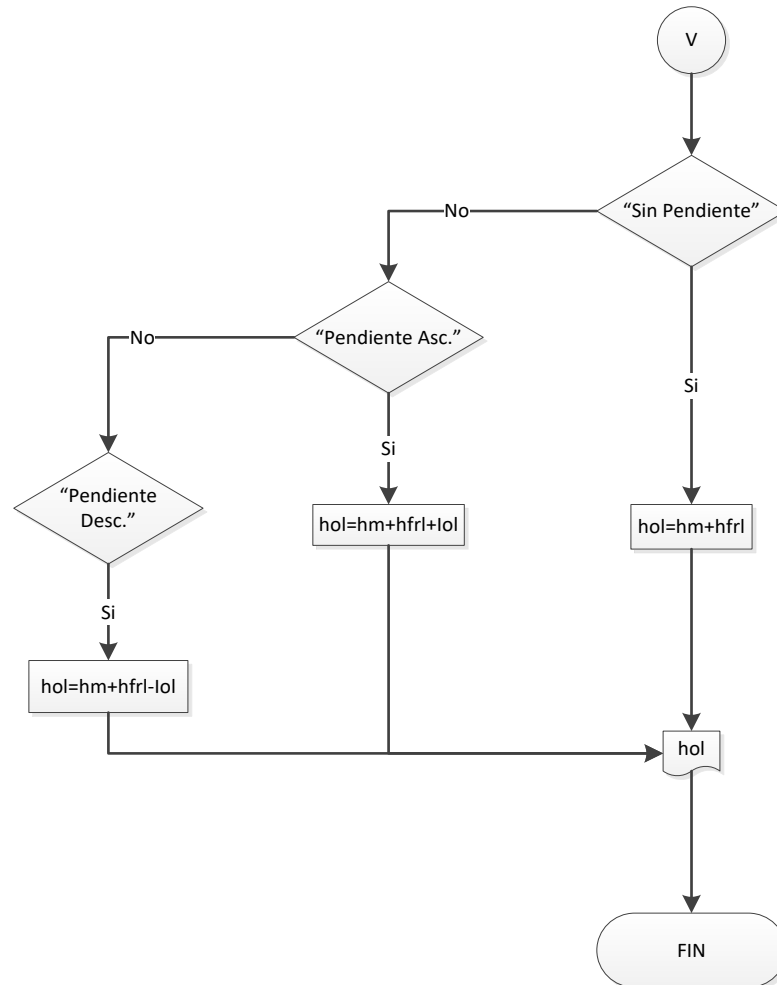
**Figura 10.** Diseño de laterales (Continuación).

Figura 11. Diseño de terciarias.

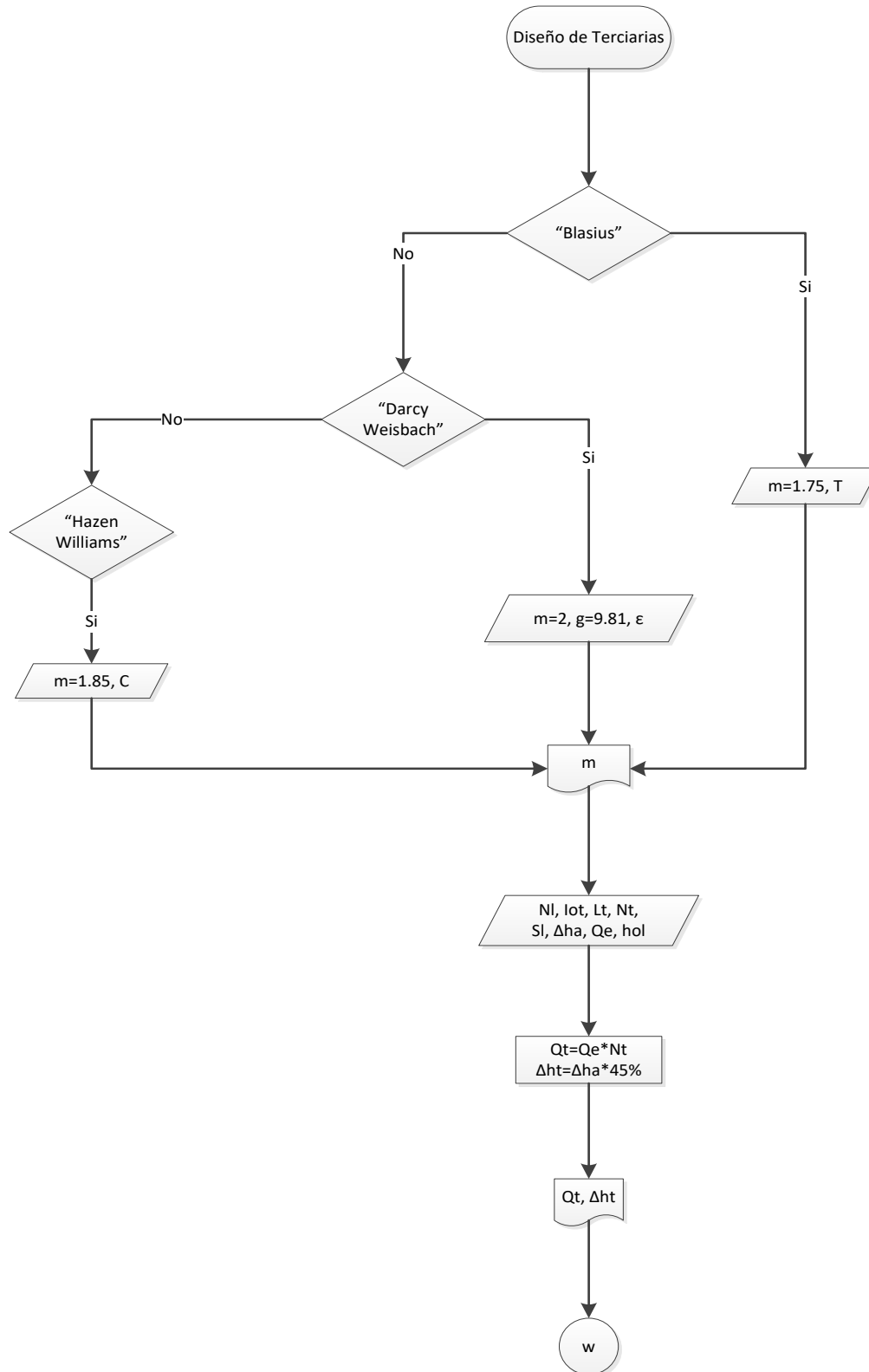


Figura 11. Diseño de terciarias (Continuación).

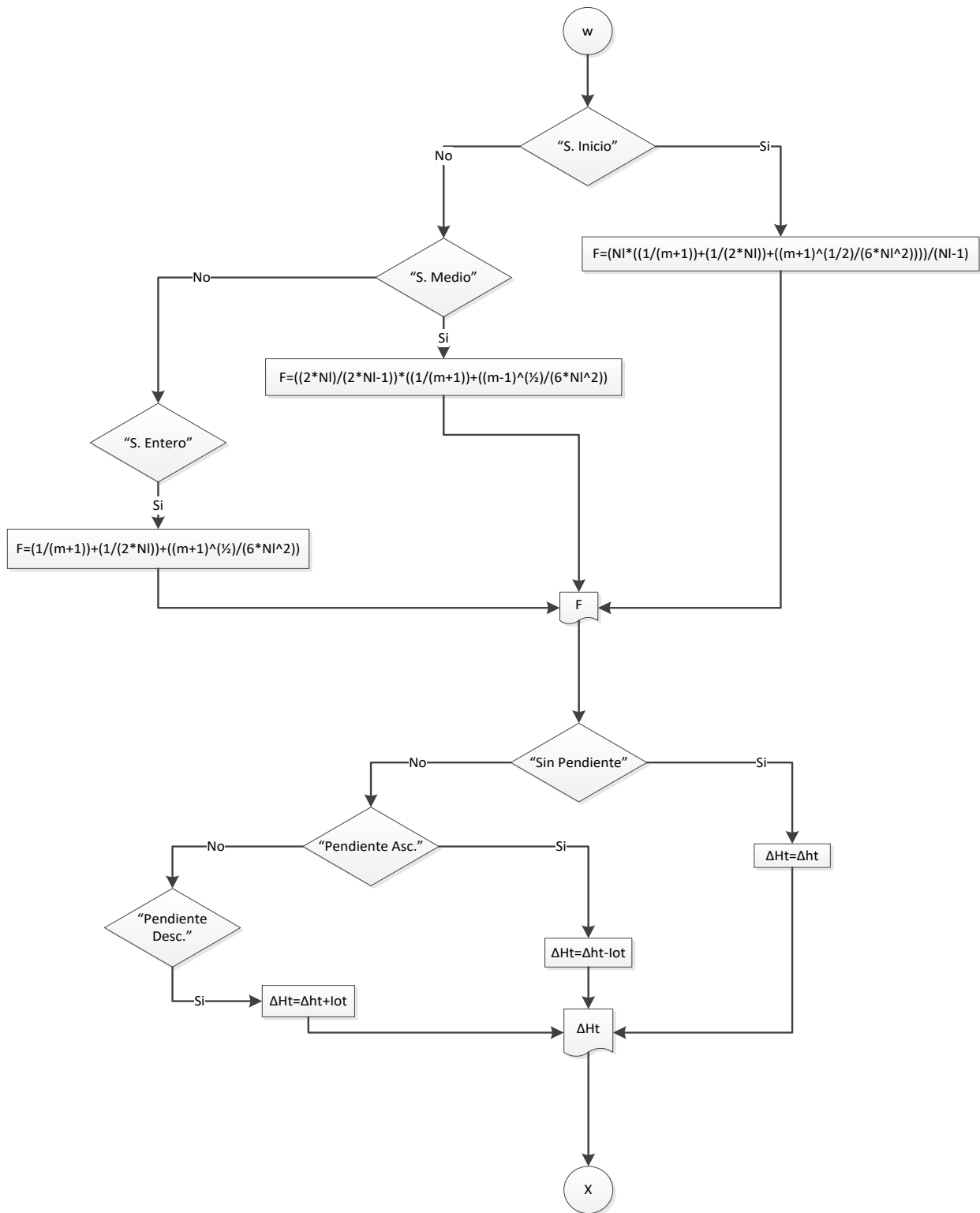


Figura 11. Diseño de terciarias (Continuación).

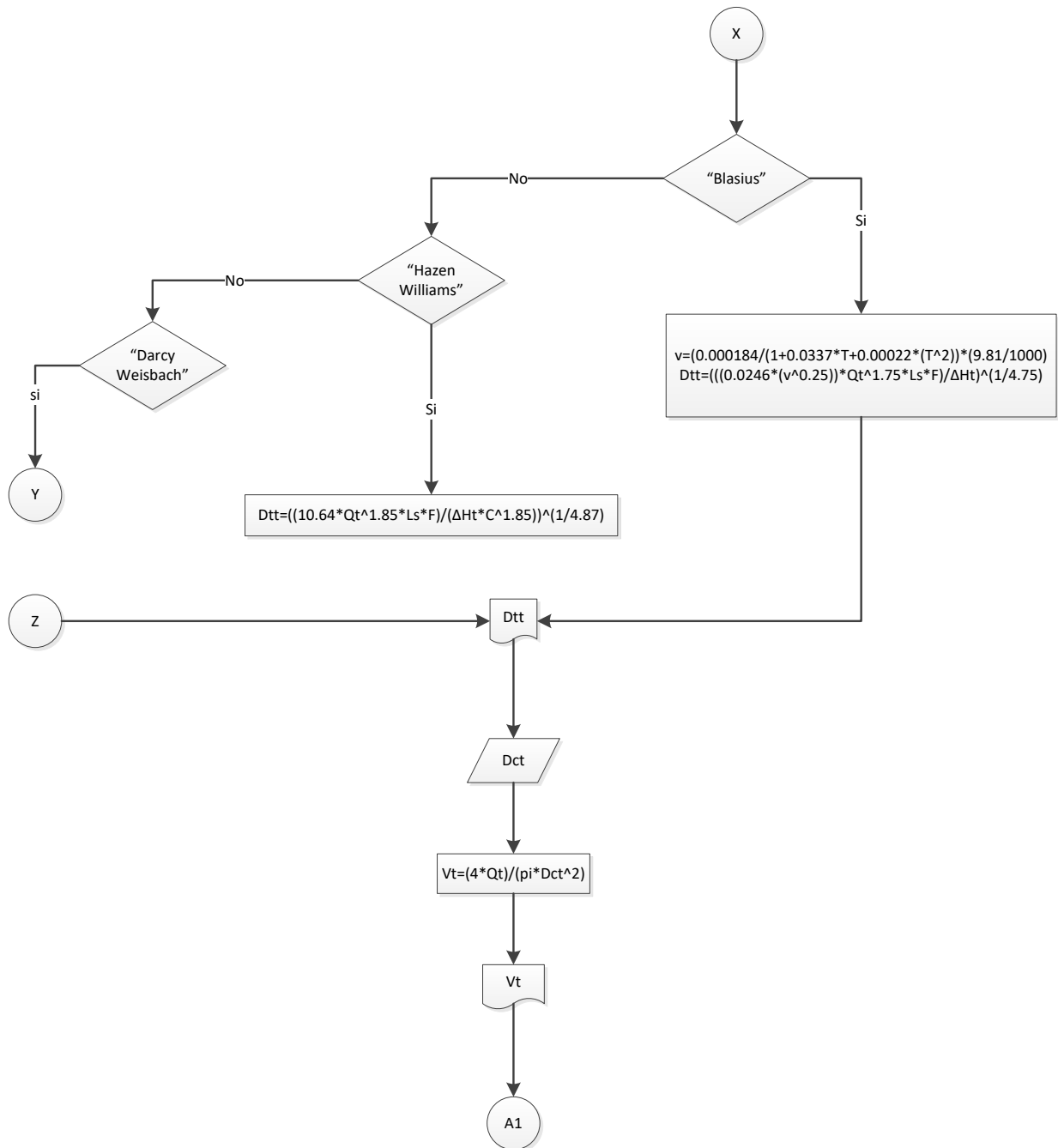
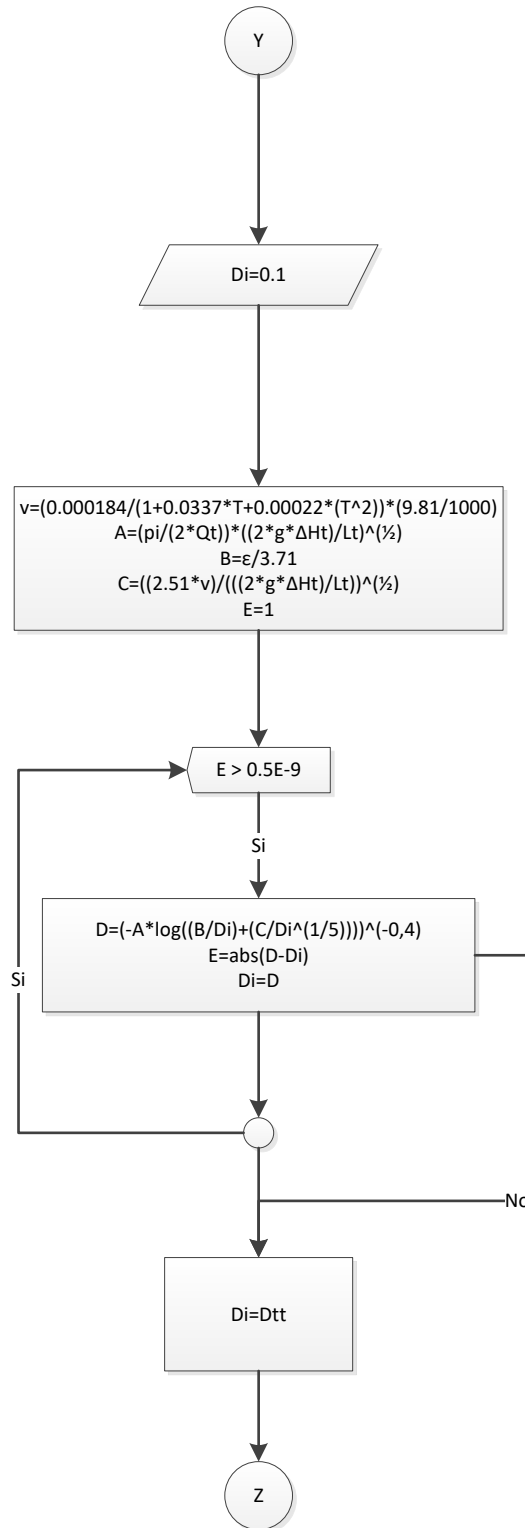


Figura 11. Diseño de terciarias (Continuación).



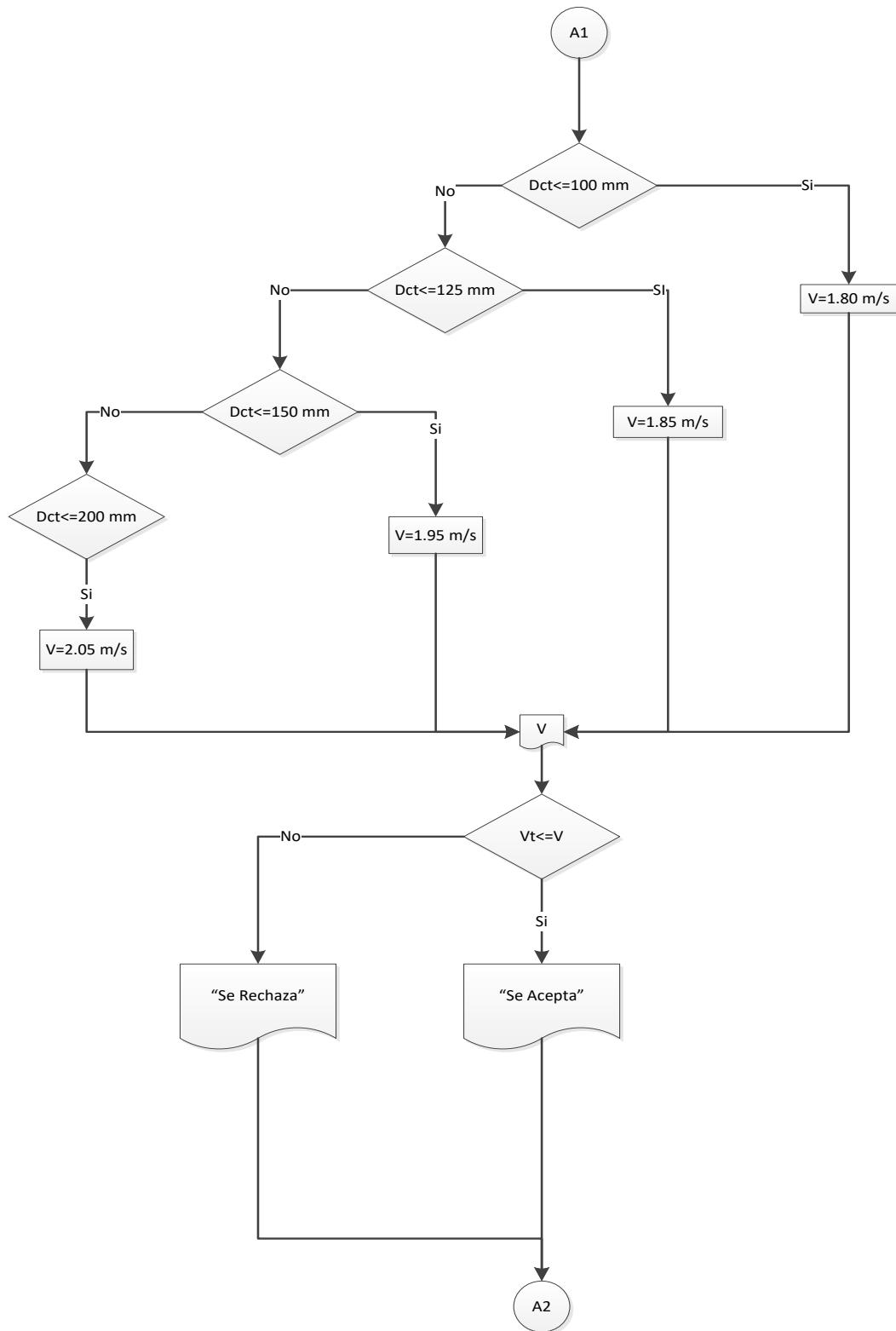
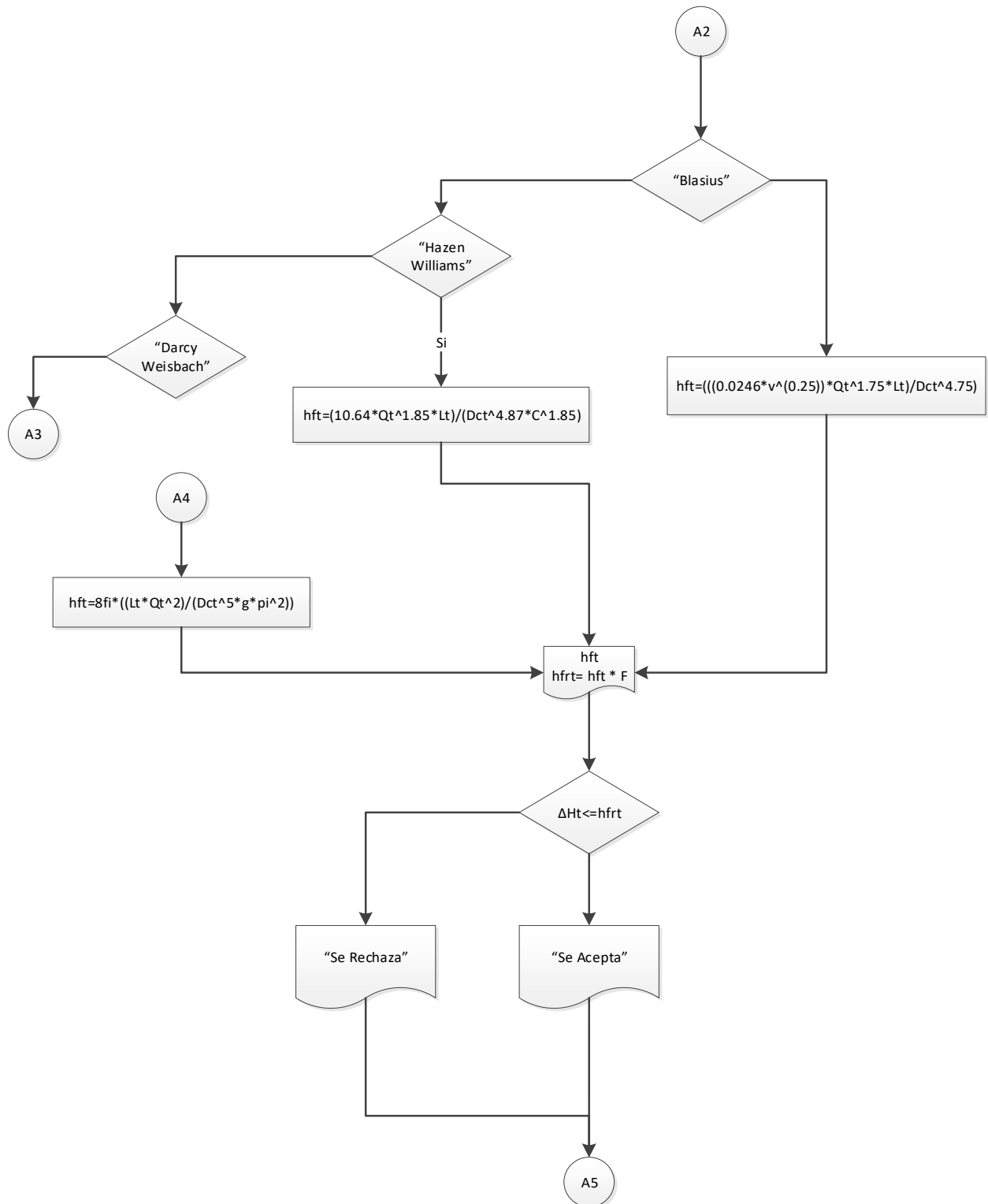
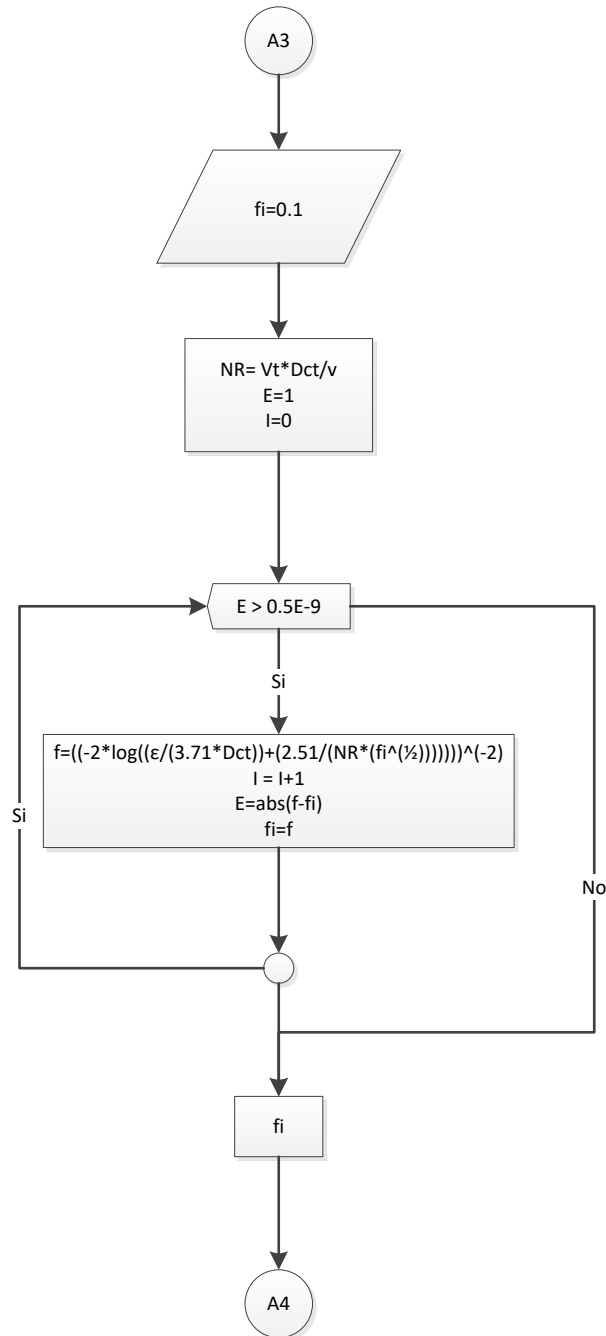
**Figura 11.** Diseño de terciarias (Continuación).

Figura 11. Diseño de terciarias (Continuación).



**Figura 11.** Diseño de terciarias (Continuación).



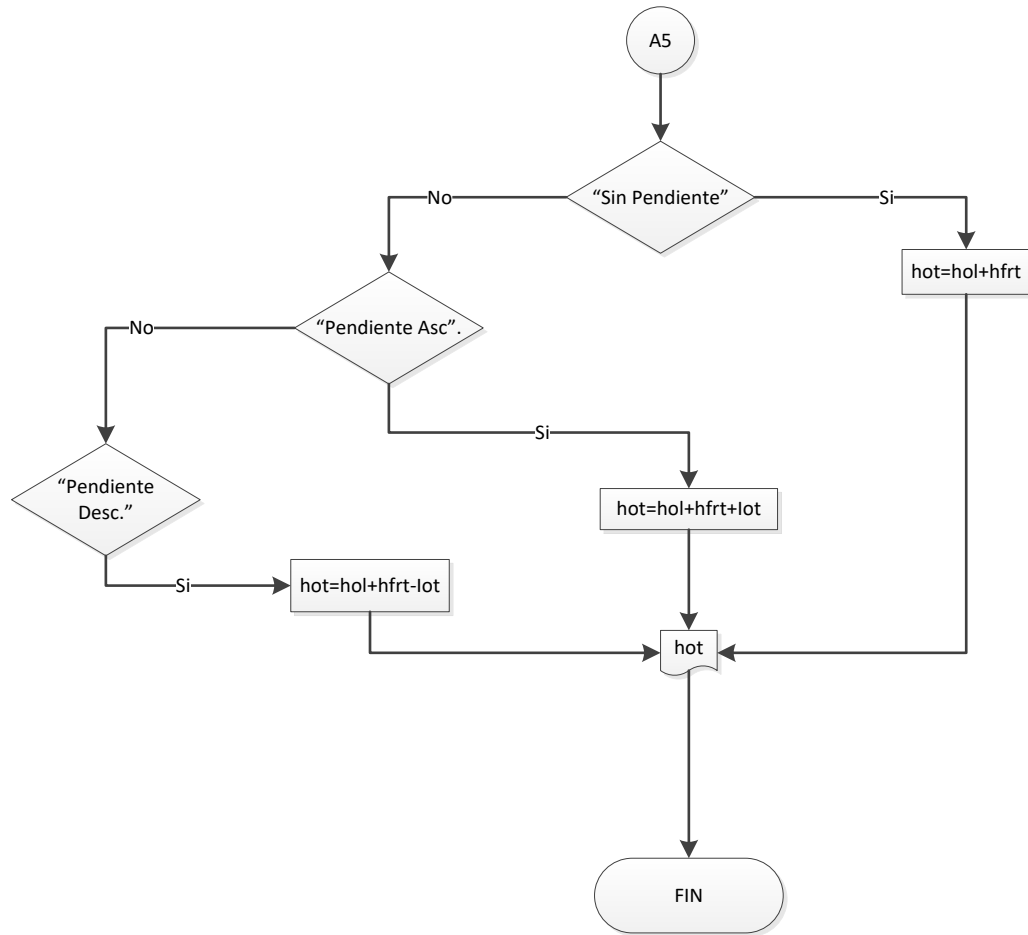
**Figura 11.** Diseño de terciarias (Continuación).

Figura 12. Diseño de la principal.

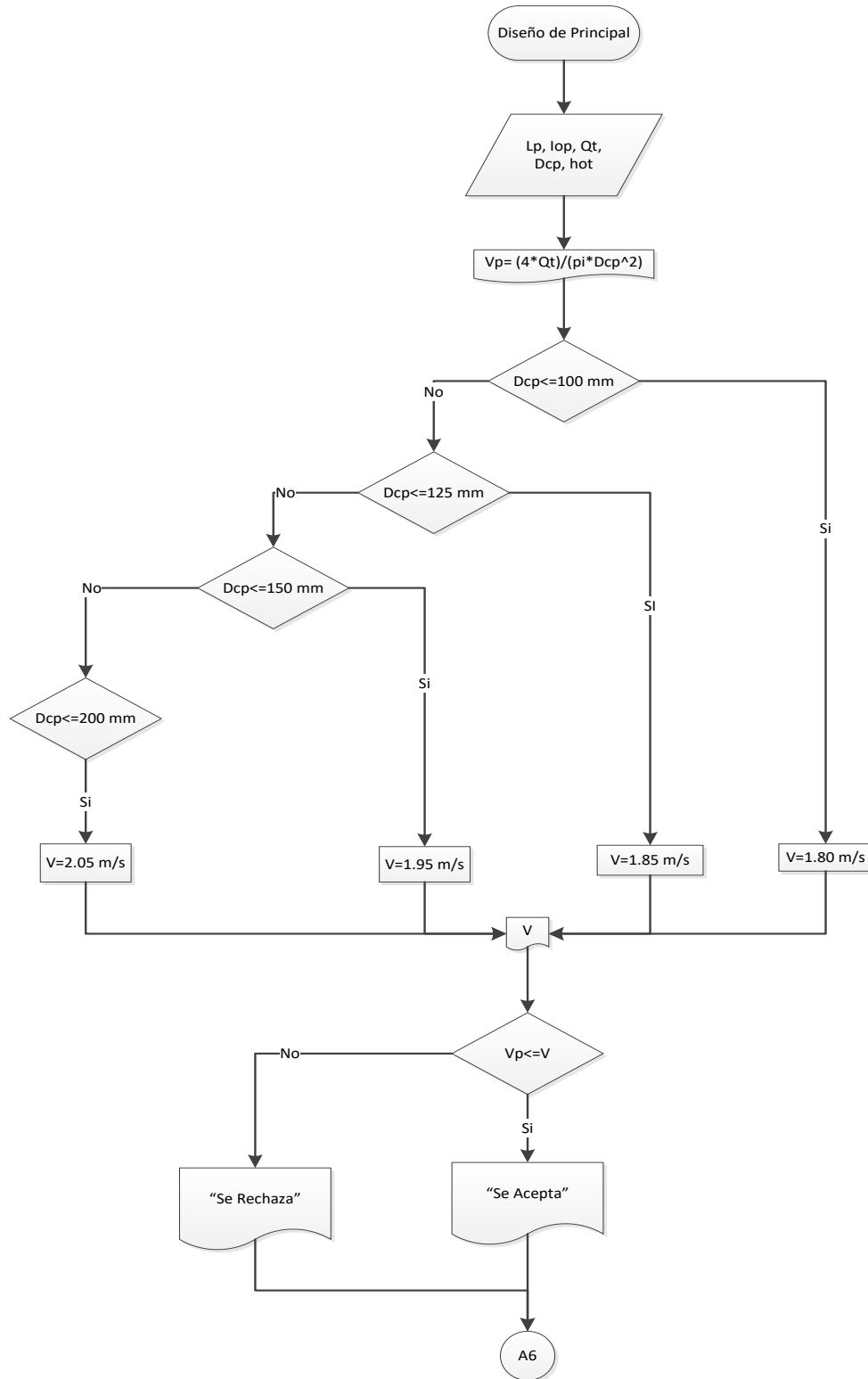


Figura 12. Diseño de la principal (Continuación).

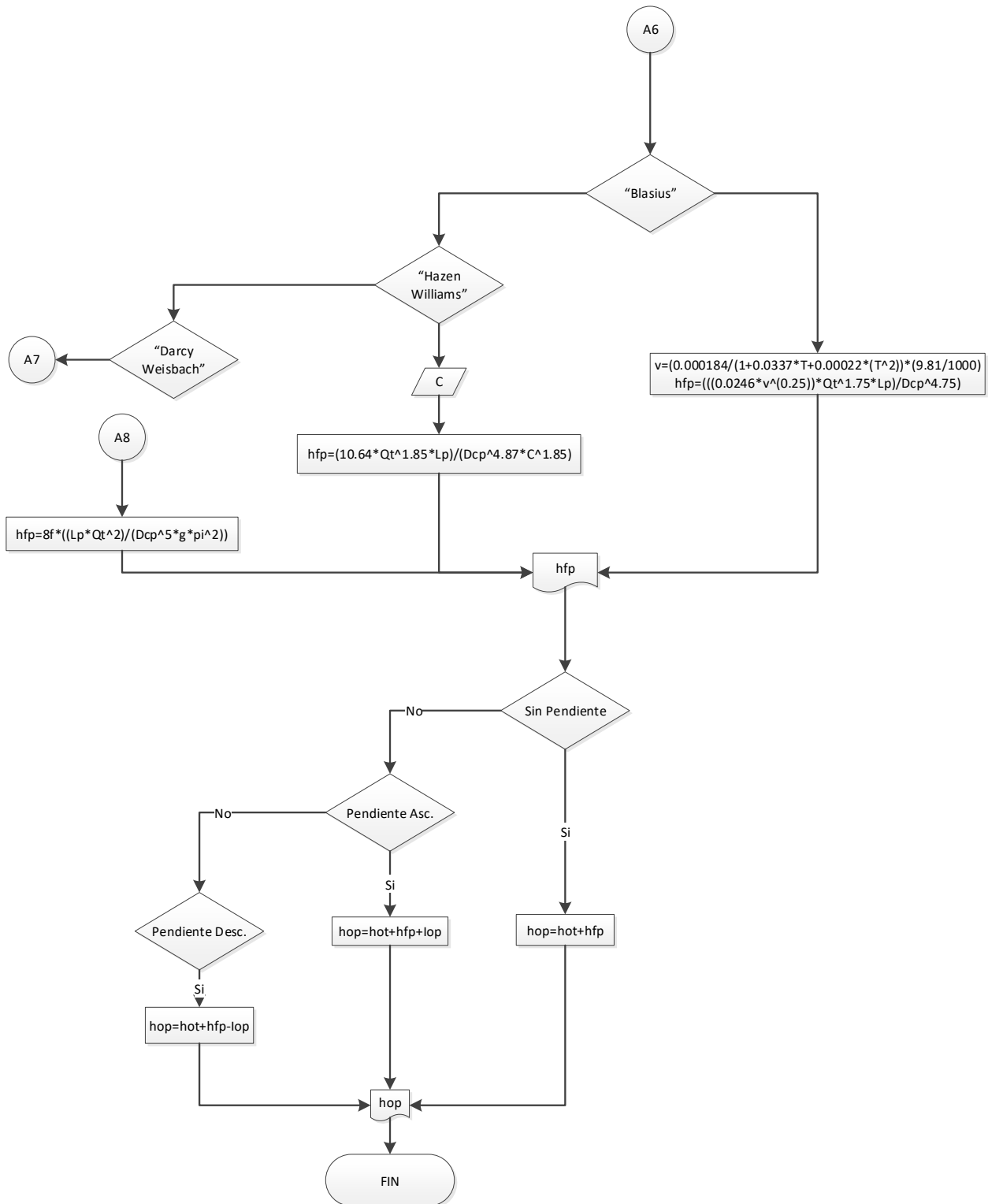
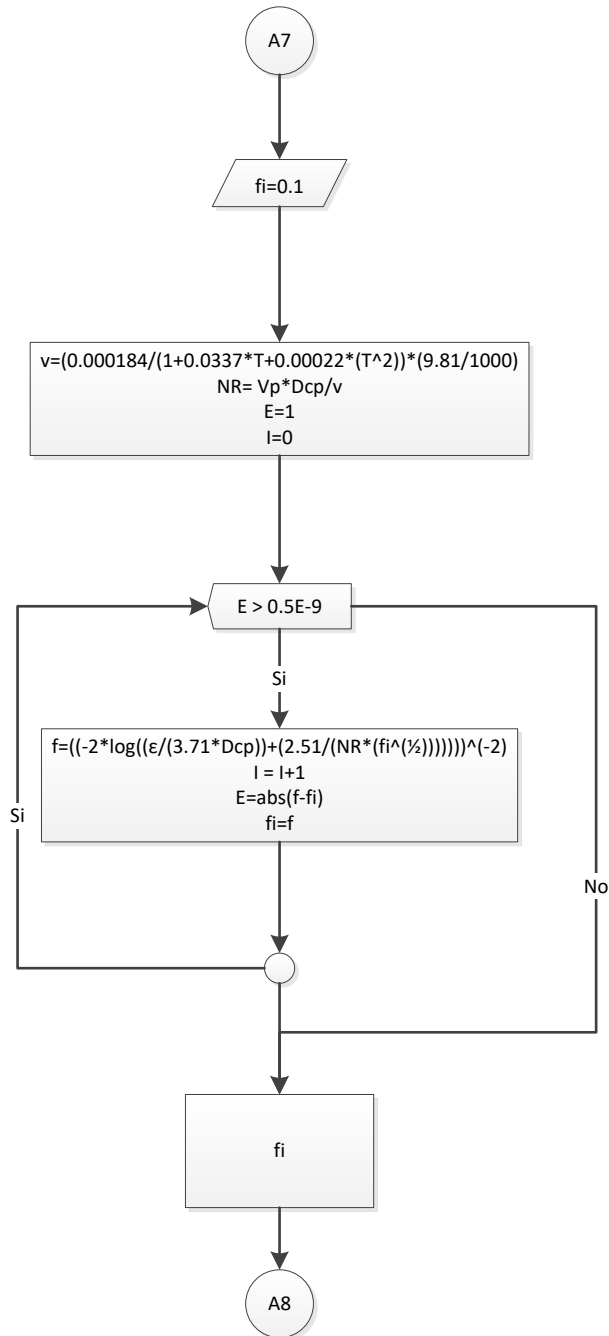
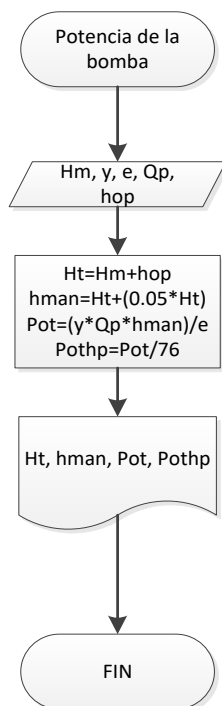


Figura 12. Diseño de la principal (Continuación).



**Figura 13.** Potencia de la bomba.

#### 4.6.1. Evaluación de riego por goteo

Para la evaluación se usó el procedimiento de Merriam y Keller (1975), el método recomienda estudiar la uniformidad de los componentes de un sistema de forma individual, de manera que al combinar los efectos individuales se puede obtener una buena estimación de la uniformidad global del sistema.

Durante la evaluación se seleccionó los ramales más representativos del conjunto de la instalación, habiéndose seleccionado un ramal al inicio, el segundo a un tercio, el tercero a dos tercios y el ultimo ramal, con este criterio se procedió también a elegir cuatro emisores de cada ramal teniendo 16 muestras en total, se colocó un vaso a cada muestra, para medir los volúmenes de cada emisor y se usó un manómetro para medir la presión del sistema de riego por goteo ver (Figura 14).

Se abrió la llave de paso y medir la presión del sistema, tomando el tiempo de inicio y final, al llenarse el primer vaso de cada fila se procedió a quitar el resto este procedimiento se lo realizo para cada fila, para luego medirlos con la ayuda de la probeta y a registrar los datos en el cuaderno de campo.

Con estos datos tabulados se calculó la uniformidad de emisión, comparando estos resultados con el cuadro de Merriam y Keller (Cuadro 9) de acuerdo a su calificación de uniformidad de emisión.

**Figura 14.** Procedimiento para la evaluación del riego por goteo.

**Fuente:** Fotografías propias (2018), Estación Experimental de Cota Cota.

- a) Medida de la distancia de los laterales.
- b) Colocado de los vasos al inicio del lateral.
- c) Vasos a 1/3 y a un 2/3 del lateral.
- d) Vasos al final del lateral.
- e) Vista de los emisores evaluados.
- f) Medición de la presión al abrir la llave.

#### 4.6.1.1. Uniformidad de distribución

Para obtener el coeficiente de uniformidad se procedió a calcular la media de todos los datos recolectados de los emisores, y la media de los valores mínimos tomando la cuarta parte de los datos.

$$UD_{1/4} = \frac{\bar{V}_{1/4}}{\bar{V}} * 100 \quad (30)$$

#### 4.6.1.2. Uniformidad de emisión

Para este procedimiento se realizó el cálculo del caudal, y el caudal de la cuarta parte de los datos en relación al volumen medio.

$$UE = \left(1 - \frac{1,27}{\sqrt{e}} * CV\right) * \frac{qe_{1/4}}{qe} \quad (31)$$

Dónde:

- UE: Uniformidad de Emisión.
- CV: Coeficiente de variación del emisor.
- e: número de emisores.
- qe: Caudal de los emisores.
- qe: Caudal cuarto de los emisores.

**Cuadro 9.** Calificación de la instalación, método de Merríam y Keller.

Uniformidad de emisión (%)	Calificación
Mayor a 90%	Excelente
de 80 a 90%	Muy Buena
de 70 a 80%	Regular
Menor a 70%	Pobre

Fuente: Citado por Serrano (2014).

#### 4.6.1.3. Manejo del sistema de riego

Todos estos datos fueron ajustados en función a la distribución normal, a partir de este ajuste se pudo establecer una relación entre la lámina aplicada y la fracción del suelo que es suficientemente regada.

#### 4.6.1.4. Diagramas de manejo

Considerando que la escorrentía es despreciable, bajo la existencia de un coeficiente de déficit “Cd” y una fracción de superficie adecuadamente regada “f” que varía fundamentalmente con el coeficiente de uniformidad “CU” y la eficiencia de distribución acumulada “Eda”.



**Lamina requerida:**

$$Eda = \frac{V_i}{\bar{V}} \quad (32)$$

**Rendimiento de aplicación:**

$$Ra = \frac{\bar{V} + \sigma * x * f - \frac{\sigma}{\sqrt{2 * \pi}} * e^{-\frac{x^2}{2}}}{\bar{V}} \quad (33)$$

**Coefficiente de déficit:**

$$Cd = 1 - \frac{Ra}{Eda} \quad (34)$$

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los datos consultados de la Estación Experimental de Cota Cota, se realizó la siguiente comparación para el procedimiento del diseño agronómico.

**Cuadro 10.** Diseño agronómico procedimiento con sales y sin sales.

	Con sales	Sin sales
E <sub>tr</sub> (mm/día)	0,509	0,509
Fr (Día)	37,67	32,54
RL	0,013	
Z <sub>nc</sub> (mm)	0,509	0,509
Z <sub>bc</sub> (mm)	0,607	0,566
Tr (hr)	0,073	0,068
Q (m <sup>3</sup> /hr)	3,52	3,52

Frecuencia de riego (Fr) 1 día.

Los resultados obtenidos en ambos métodos muestran una similitud en los cálculos, esto se debe a la baja concentración de sales, según Medrano R. (2006), el agua de riego de Cota Cota, tiene una conductividad eléctrica de 0,00309 dS/m, eh indica que el agua es apta para el riego (Cuadro 2), por su baja concentración de sales, no se requiere el cálculo de lavado de sales.

La frecuencia de riego seleccionada es de un día para ambos métodos por ser la más recomendada. En la metodología de sin lavado de sales la eficiencia de aplicación es de 90 %. Se usó una eficiencia de aplicación de 85 % por las características de clima, suelo y profundidad radicular del cultivo, (Cuadro 4) en la metodología con lavado de sales, según Salas y Pérez (2007).

La eficiencia de aplicación según el clima, suelo y profundidad radicular se adecua a las condiciones del lugar donde se realice el sistema de riego, el cálculo de lavado de sales para evitar la acumulación de sales en el área radicular del cultivo, si la conductividad eléctrica del agua fuera mayor a 0,7 dS/m.

Se realizó la medición de un sistema de riego por goteo ya instalada en un invernadero de la Estación Experimental de Cota Cota, para el proceso del diseño hidráulico, los datos necesarios son los siguientes.

**Cuadro 11.** Datos Sistema de riego por goteo.

Laterales	Terciarias	Principal
Ha: 15 m.c.a.	Lt: 5 m	lop: 0 m
Qe: 2 lt/hr	lot: 0 m	Lp: 1 m
Ll: 29 m	Nl: 9	
lol: 0,45 m	Sl: 0,3	
Ne: 1	<b>Distancia entre laterales:</b>	
x: 0,4	entero.	
CU: 0,85	<b>Pendiente:</b> Sin pendiente	
CV: 0,03		
Se: 0,3		
<b>Distancia entre emisores:</b>		
entero.		
<b>Pendiente:</b> descendente.		

**Fuente:** Estación Experimental de Cota Cota, Facultad de Agronomía.

Se incorporo la ecuación de Pouseuille (28) para el cálculo de la viscosidad cinemática del agua ( $\nu$ ) y se realizó la comparación con la viscosidad cinemática del agua disponible en tablas, la cual es necesaria para las ecuaciones de perdida de carga de Blasius y Darcy Weisbach, la temperatura con la que se trabajo fue de 20 °C (Butron C. 2017), la viscosidad cinemática a esta temperatura es de  $1,02 \text{ E}^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  en la ecuación de Poiseuille y en tabla.

En la ecuación de Darcy Weisbach, se realizó una comparación de la ecuación de Colebrook White y Swamee Jain, para el factor de fricción ( $f$ ). Se uso el método de Newthon Raphson para el cálculo del diámetro y ( $f$ ) en la ecuación de Colebrook.

**Cuadro 12.** Diseño del lateral comparación de la viscosidad ( $\nu$ ) y el factor de fricción ( $f$ ).

Variable	Blasius		Darcy Weisbach	
	Pouseuille	( $\nu$ ) Tabla	Pouseuille Colebrook	( $\nu$ ) Tabla Swamee Jain
F	0,369	0,369	0,388	0,388
Dtl (mm)	6,71	6,70	6,96	8,24
hfl (m)	1,017	1,014	1,011	1,021
hfrl (m)	0,375	0,374	0,342	0,345
hol (m)	10,936	10,934	10,903	10,906

**Cuadro 13.** Diseño de la terciaria comparación de la viscosidad ( $\nu$ ) y el factor de fricción ( $f$ ).

Blasius			Darcy Weisbach	
Variable	Pouseuille	( $\nu$ ) Tabla	Pouseuille Colebrook	( $\nu$ ) Tabla Swamee Jain
F	0,423	0,423	0,391	0,391
Dtt (mm)	5,992	5,986	6,249	7,164
hft (m)	0,057	0,0568	0,057	0,0571
hfrt (m)	0,024	0,024	0,022	0,0223
hot (m)	10,96	10,958	10,926	10,928

**Cuadro 14.** Diseño de la principal comparación de la viscosidad ( $\nu$ ) y el factor de fricción ( $f$ ).

Blasius			Darcy Weisbach	
Variable	Pouseuille	( $\nu$ ) Tabla	Pouseuille Colebrook	( $\nu$ ) Tabla Swamee Jain
hfrp (m)	0,011	0,011	0,011	0,0114
hop (m)	10,971	10,969	10,937	10,940

En la ecuación de Blasius en su forma general los resultados se asemejan mucho, al incorporar la ecuación de Pouseuille la cual no tiene mucha diferencia con la viscosidad obtenida en tablas, al usar la ecuación de Pouseuille los resultados se adecuan a cualquier temperatura que el agua tuviera, ya que el caudal del agua varía de acuerdo al impacto de la temperatura en la viscosidad del agua.

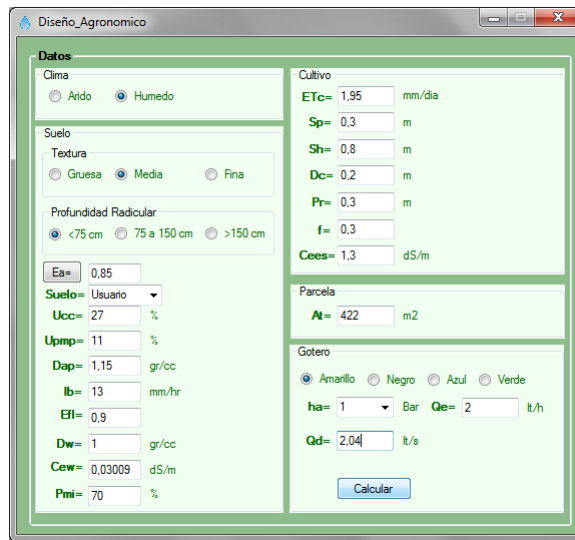
La ecuación de Colebrook es la más recomendable para el cálculo de  $f$ , pero por tener un procedimiento tedioso muchos optan por otras opciones, el avance de la tecnología permite facilitar estos cálculos usando un programa o la opción solve, para poder usar este tipo de ecuaciones implícitas. En el cálculo del diámetro se usó la metodología de Newthon Raphson para el cálculo de la pérdida de carga en Darcy Weisbach.

### 5.1. Programa Agrologíc

Con los diagramas de flujo mostrando todo el proceso para los cálculos del diseño agronómico e hidráulico, se realizó la programación en la plataforma de Visual Studio, obteniendo un programa interactivo con el usuario mostrando mensajes de ayuda (tooltips), una base de datos de suelo y cultivo necesarios para el uso del programa.

El llenado de datos en el diseño agronómico se lo realizo con los datos obtenidos de la Estación Experimental de Cota Cota, para poder introducir los datos de suelo se debe seleccionar “Usuario”, o seleccionar una de las doce clases texturales.

**Figura 15.** Diseño agronómico llenado de datos.

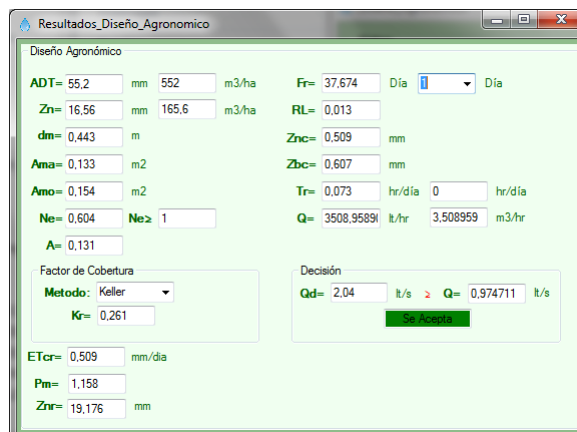


El diseño de la ventana de los resultados se lo realizo de la siguiente manera:

Selección:

- Método del Factor de cobertura (Kr)
- Frecuencia de riego (Fr).

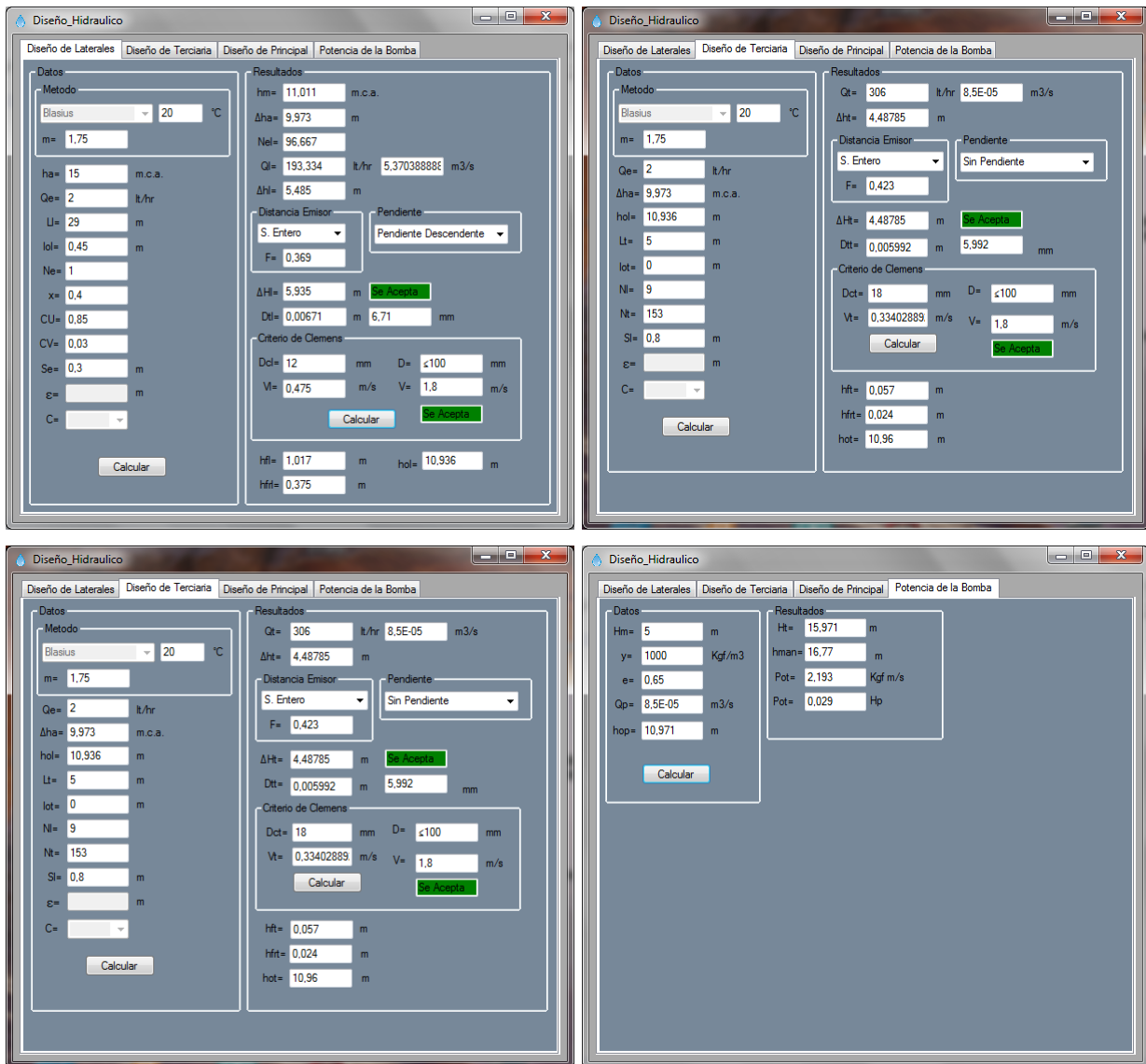
**Figura 16.** Diseño agronómico resultados.



En el diseño hidráulico se seleccionó la ecuación de Blasius, Darcy Weisbach y Hazen Williams para el cálculo de pérdida de carga ( $h_f$ ), el usuario podrá escoger entre estos tres métodos.

Para comprobar de que el programa realiza los cálculos de forma correcta se usó la calculadora Classpad II, con la cual verifiqué los resultados obtenidos con el programa, esto se lo siguió con cada ecuación de pérdida de carga obteniendo los siguientes resultados con el programa:

**Figura 17.** Diseño hidráulico Blasius (formula general).



El procedimiento del diseño hidráulico usando la ecuación de Blasius fue el siguiente:

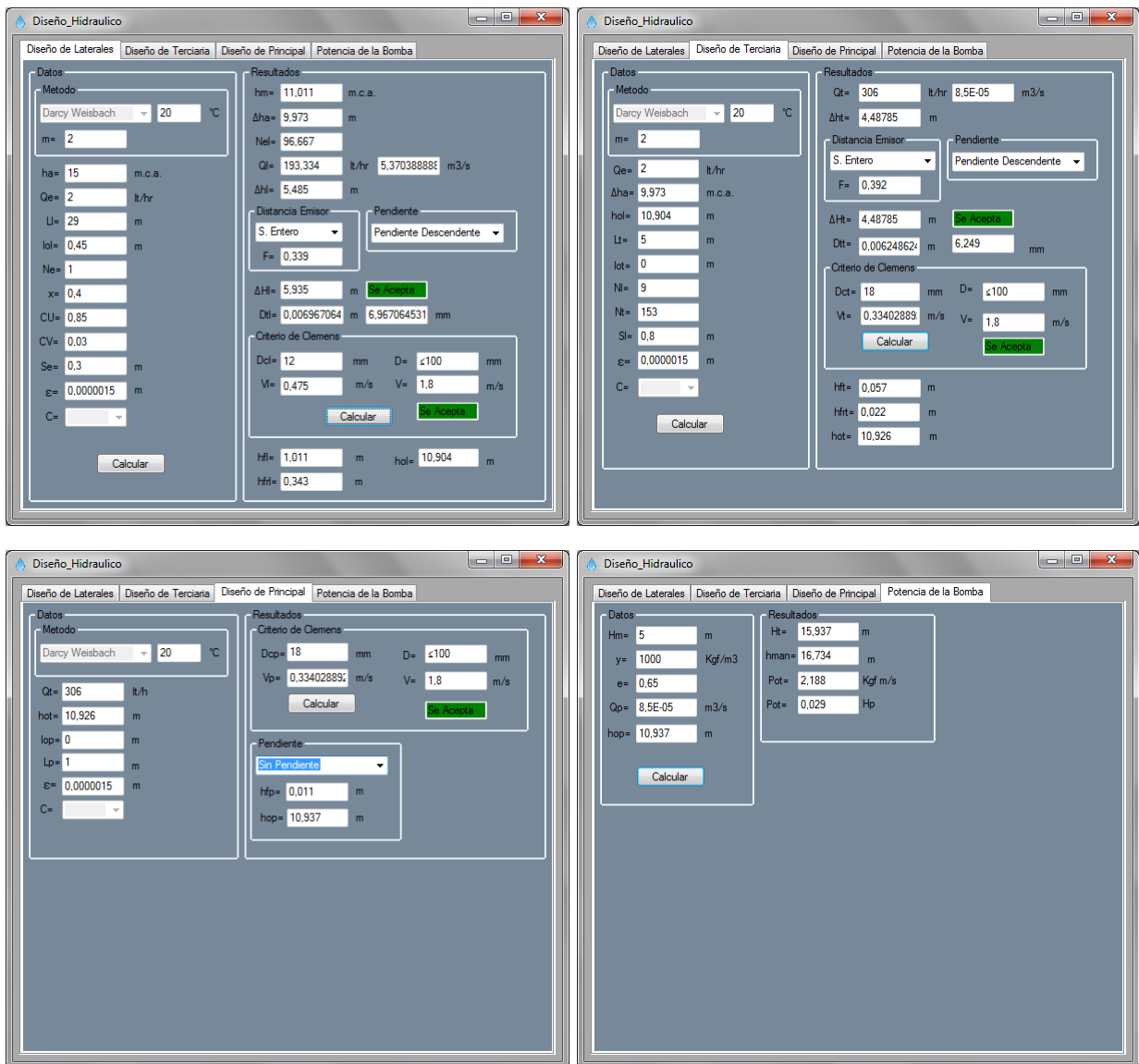
Calculo:

- (Pouseuille) Viscosidad cinemática del agua ( $\nu$ ).

Selección:

- Distancia de los emisores y laterales
- Sentido de la pendiente.

Figura 18. Diseño hidráulico Darcy Weisbach.



El procedimiento del diseño hidráulico usando la ecuación de Darcy Weisbach fue el siguiente:

Calculo.

- (Pouseuille) Viscosidad cinemática del agua ( $\nu$ ).

Selección.

- Distancia de los emisores o laterales.
- Sentido de la pendiente.

Método de Newthou Raphson:

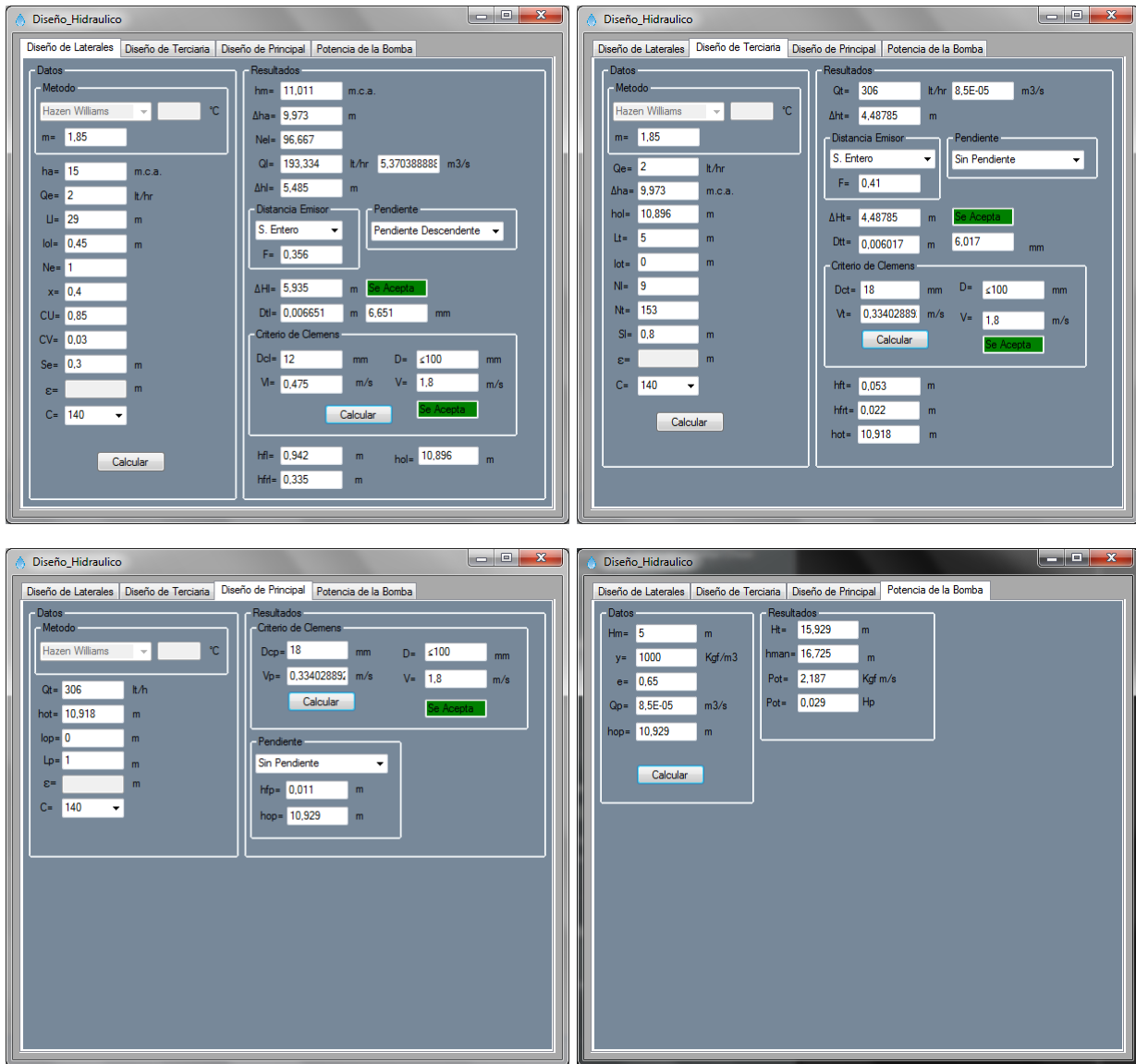
- Diámetro teórico ( $d_t$ ).
- (Colebrook) Factor de fricción ( $f$ ).

No se realizó ningún cambio en el procedimiento del diseño hidráulico, empleando la ecuación de Hazen Williams. Los resultados conseguidos con el programa fueron verificados manualmente en la calculadora Classpad II en el cual se obtuvo los mismos resultados.

En el sistema de riego por goteo de la Estación de Experimental de Cota Cota, del cual se obtuvo los datos para ejecutarlas en el programa Agrologíc, no se observó una bomba, para el cálculo de la potencia de la bomba se tomó datos con referencia a libros y datos técnicos El diseño del programa para el cálculo del diseño hidráulico se lo elaboro por subprogramas para un manejo más fácil.



Figura 19. Diseño hidráulico Hazen Williams.



## 5.2. Validación del programa

Para la validación del programa se realizó la comparación de los resultados siguiendo el procedimiento recomendado por Agro Náyade, Chow J y el uso del Software Aqua y Tlaloc, tomando las variables más importantes en el diseño agronómico para el riego por goteo.

**Cuadro 15.** Comparación del diseño agronómico con otros autores; lámina bruta, frecuencia de riego, tiempo de riego y caudal necesario.

Variable	Agro náyade	Chow	Veintimilla Tlaloc y Aqua	Agrológic
Zbc (mm/día)	0,599	0,688		0,607
Fr (día)	1	1	1	1
Tr (horas)	0,071	0,083	0,28	0,073
Q (m <sup>3</sup> /hora)	3,50	3,52	3,29	3,51

Lamina bruta corregida (Zbc), frecuencia de riego (Fr), Tiempo de riego (Tr) y Caudal (Q).

La frecuencia de riego (Fr) tomada para todos los métodos es de un día, autores como agronayade calculan la frecuencia de riego como un intervalo máximo de riego y calculan el caudal en relación al volumen total y el tiempo de operación (Top). Chow, calcula el caudal del diseño en volumen por tiempo de riego. Veintimilla, calcula el caudal requerido entre la lámina bruta corregida.

Los resultados obtenidos con el programa Agrológic, considera el lavado de sales un problema actual que disminuye la producción de los cultivos, el actual problema del agua. Son factores que deben ser considerados en el proceso del diseño agronómico.

### Diseño hidráulico

Para la validación de la metodología del diseño hidráulico se realizó una comparación con el uso de la ecuación de pérdida de carga de Hazen Williams siendo el método que no cambio en su metodología, la consideración de la Viscosidad cinemática en relación a la temperatura en la ecuaciones de Blasius y Darcy Weisbach, y el uso de la ecuación de Colebrook, para saber en cuanto varia se usó el coeficiente de variación como indicador esto se lo realizó en el cálculo de diseño de laterales, diseño de terciarias, diseño de la principal y potencia de la bomba.

En la evaluación solo se consideró Factor de fricción de Christiansen (F), Diámetro teórico (Dt), pérdida de carga (hf), pérdida de carga reducida (hfr), presión al inicio (ho), y potencia de la bomba (valor en kgf), debido a que el resultado es diferente para cada método.

**Cuadro 16.** Diseño de laterales.

Variable	Blasius	Darcy Weisbach	Hazen Williams
F	0,369	0,338	0,356
Dt (m)	6,71 E <sup>-3</sup>	6,96 E <sup>-3</sup>	6,65 E <sup>-3</sup>
hfl (m)	1,017	1,011	0,942
hfri (m)	0,375	0,3423	0,335
hol (m)	10,936	10,903	10,896

**Cuadro 17.** Diseño de terciarias.

Variable	Blasius	Darcy Weisbach	Hazen Williams
F	0,423	0,391	0,410
Dt (m)	5,992	6,24	6,02
hfl (m)	0,057	0,057	0,053
hfri (m)	0,024	0,022	0,022
hol (m)	10,96	10,926	10,918

**Cuadro 18.** Diseño de la principal.

Variable	Blasius	Darcy Weisbach	Hazen Williams
hfp (m)	0,011	0,011	0,011
hop (m)	10,97	10,94	10,93

**Cuadro 19.** Potencia de la bomba.

Variable	Blasius	Darcy Weisbach	Hazen Williams
Ht (m)	15,97	15,97	15,93
Hp (m)	16,77	16,77	16,73
Pot (Kgf)	2,19	2,19	2,19

Los resultados para el diseño de laterales, terciarias y la principal se encuentran en un rango aceptable por tener un coeficiente de variación (CV) de 0,18 % en el procedimiento del diseño hidráulico, no existe variación en los resultados obtenidos con la ecuación de Blasius, Darcy Weisbach y Hazen Williams.

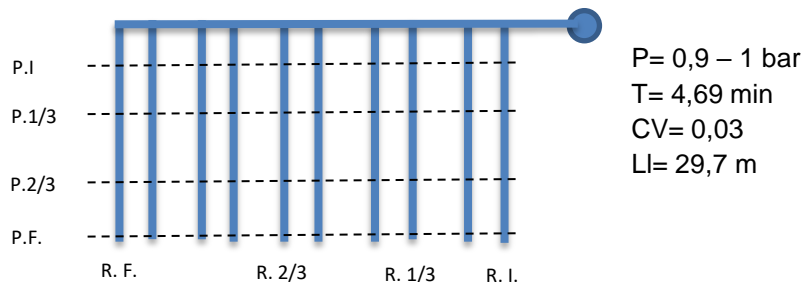
### 5.3. Evaluación de un sistema de riego por goteo

**Cuadro 20.** Volumen obtenido por los emisores en (ml).

	R. Inicio	R. 1/3	R. 2/3	R. Final
P. Inicio	160	149	160	114
P. 1/3	113	183	180	184
P. 2/3	158	180	175	156
P. Final	166	180	118	171

Estos datos se obtuvieron según la metodología de Karmelly y Keller, tomando la presión, el tiempo en el transcurso de la recolección de datos, en el siguiente croquis (Figura 20) se muestra los emisores seleccionados.

**Figura 20.** Croquis de los emisores evaluados.



Con los datos recolectados del invernadero se procedió a realizar los cálculos obtenidos en los siguientes cuadros y gráficos:

**Cuadro 21.** Resultados de la evaluación del sistema de riego por goteo.

UD <sub>1/4</sub>	77,58 %	
q	33,94 ml/min	2,04 lt/hr
q <sub>1/4</sub>	26,33 ml/min	1,58 lt/hr
UE	0,746	Regular

La uniformidad de distribución (UD) es de 77,58 % el caudal medio (q) de 33,94 ml/min en relación al volumen medio y el tiempo de realización de la prueba, el caudal medio del cuarto (q<sub>1/4</sub>) de los datos fue de 26,33 ml/min, sabiendo que el Coeficiente de Variación (CV) es de 0,03 según el fabricante, con este valor y según la clasificación de Merriam y Keller (Cuadro 9) se obtiene una clasificación regular por obtener el 74,6 % en la uniformidad de emisión (UE) y un coeficiente de uniformidad (CU) 88,45 % lo cual indica que es muy buena.

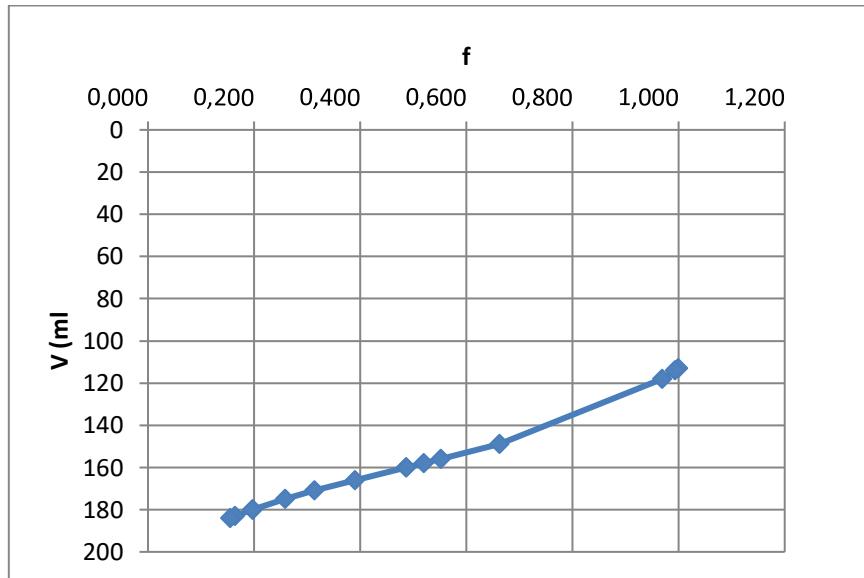
### Diagrama de manejo

Los datos pueden ser ajustados a una función de distribución normal (Figura 21), a partir de estos datos se puede establecer una relación entre la lámina aplicada y la fracción del suelo suficientemente regada y el diagrama de manejo para la evaluación (Figura 22).

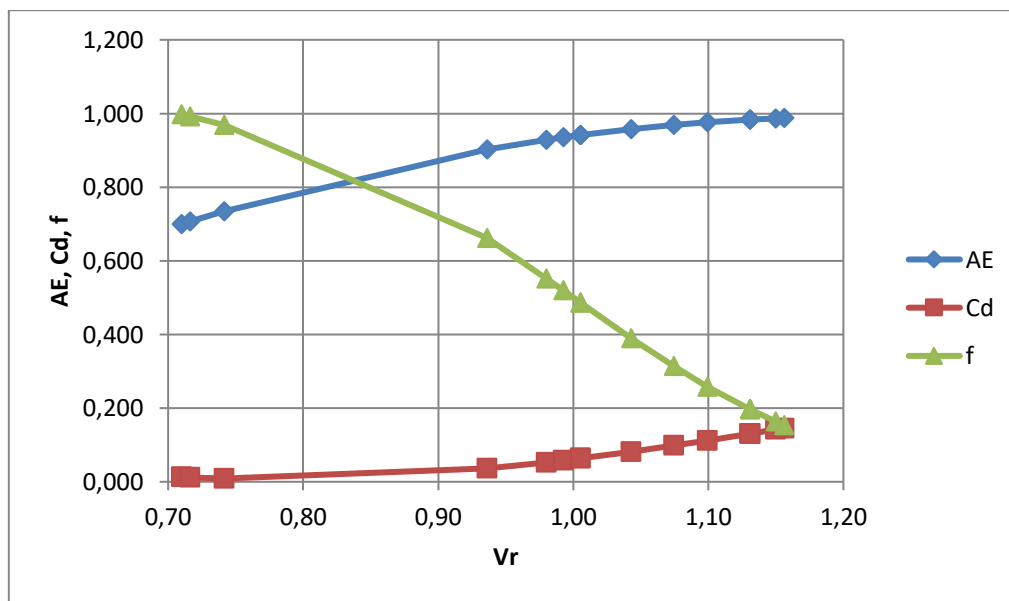
**Cuadro 22.** Resultado de volumen emitido por emisor, fracción del suelo (f), lamina requerida (Vr), Rendimiento de aplicación (AE) y Coeficiente de descarga (Cd).

V (ml)	f	Vr	AE	Cd
113	0,999	0,71	0,700	0,014
114	0,953	0,72	0,716	0,010
118	0,930	0,75	0,741	0,010
149	0,624	0,94	0,899	0,049
156	0,525	0,99	0,924	0,065
158	0,496	1,00	0,931	0,071
160	0,468	1,01	0,937	0,076
160	0,468	1,01	0,937	0,076
166	0,383	1,05	0,953	0,094
171	0,316	1,08	0,964	0,111
175	0,267	1,11	0,971	0,124
180	0,211	1,14	0,979	0,142
180	0,211	1,14	0,979	0,142
180	0,211	1,14	0,979	0,142
183	0,181	1,16	0,983	0,153
184	0,172	1,17	0,984	0,157

**Figura 21.** Ajuste de la distribución normal a los datos de campo.



**Figura 22.** Diagrama de manejo del riego para una función de distribución normal.



El rendimiento de aplicación (AE) tiene la probabilidad de ir aumentando desde 0,70 hasta 0,93, sin que la lámina requerida ( $V_r$ ) sobrepase a la lámina bruta acumulada ( $H_{ba}$ ), significa que como mínimo se admite un déficit de 1,4 % y como máximo 7,1 %, con una fracción de suelo adecuadamente regada entre el 99,9 % y 49,6 % respectivamente, aunque lo ideal será mantenerse cercano al 85% de fracción del suelo adecuadamente regado ( $Cd = 4,9\%$  y  $AE=89,9 \%$ ).

## 6. CONCLUSIONES

Sobre el programa realizado y las consideraciones que se tomaron en su desarrollo se presentan las siguientes conclusiones:

- La elaboración de un programa permite sistematizar y automatizar todo tipo de información, permitiendo realizar una tarea en específico en el menor tiempo posible, la creación de nuevas herramientas y el uso de estas permite al ingeniero agrónomo el elaborar un proyecto de riego en el menor tiempo posible.
- Es necesario estar actualizado e informado de los problemas actuales que existen en el ámbito de la agronomía, así como también tener las herramientas capaces de afrontar estos problemas, los programas existentes ayudaron mucho, pero con el avance de la tecnología que cambia en el tiempo estas herramientas van quedando obsoletas por lo que es necesario actualizarlas.
- La importancia del requerimiento de lavado de sales en el área radicular del cultivo permite evitar pérdidas en la producción, por lo que es importante obtener los datos de la conductividad eléctrica del agua y el suelo, esto es un indicador de la presencia de sales, y es necesario elaborar un diseño agronómico que lo considere.
- La influencia del incremento en la temperatura del agua influye en la viscosidad cinemática del agua y influyendo en el caudal del agua, las ecuaciones disponibles para el cálculo de pérdida de carga de Blasius son de 10 a 20 °C. y las viscosidades cinemáticas del agua disponibles en tablas vienen en un intervalo de 5 °C, con la ecuación de Pouseuille se podrá obtener la viscosidad cinemática para cualquier temperatura.
- El método de Newthon Raphson, permite resolver ecuaciones implícitas los cuales requieren de muchas iteraciones para poder resolverlas, este método resulta tedioso e incluso frustrante el uso de un programa facilita este procedimiento realizándolo en el menor tiempo posible.
- La realización de un programa considerando todas las herramientas necesarias para el diseño de un sistema de riego por goteo como tablas, mensajes de ayuda

y parámetros que indiquen si los resultados son aceptables facilita mucho el uso de este.

- Los resultados obtenidos con el programa Agrologic no tienen mucha variación con la metodología de otros autores, obteniendo resultados aceptables. el uso del programa considera la temperatura del agua y el lavado de sales.
- Es importante el realizar una evaluación del sistema de riego ya que esto permite detectar a tiempo alguno de los componentes que afecten negativamente a la uniformidad de un sistema de riego por goteo.



## 7. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos al realizar el programa se recomienda lo siguiente:

- Estar actualizado con el avance de la tecnología, mucho de los avances que se dan es para facilitar las tareas que realiza el hombre día a día, la informática es un área necesaria para el desarrollo de nuevas herramientas para el profesional.
- Se debe considerar el requerimiento de lavado de sales en el proceso del diseño agronómico, esto para prevenir el acumulamiento de sales en el área radicular del cultivo y así poder evitar pérdidas en la producción.
- Es necesario contar con los datos de conductividad eléctrica del agua y el suelo para el uso del programa.
- La eficiencia de aplicación depende del clima, suelo y la profundidad radicular esta varía de acuerdo a estos factores considerando estos factores es recomendable usar el criterio de Keller para la eficiencia de aplicación.
- La viscosidad cinemática es influenciada por la temperatura del agua este es un factor influye en el caudal del riego es recomendable usar la ecuación de Pouseille por adecuarse a cualquier temperatura.
- Los resultados obtenidos con un programa son obtenidos en el menor tiempo posible, se recomienda saber el proceso que realiza el programa para no cometer errores en el desarrollo de un proyecto de riego.
- La evaluación de uniformidad de un sistema de riego es importante, ya que un mal manejo afecta en la distribución de agua de manera equitativa, por lo que es importante evaluar la uniformidad y ubicar las fallas en el sistema de riego por goteo.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

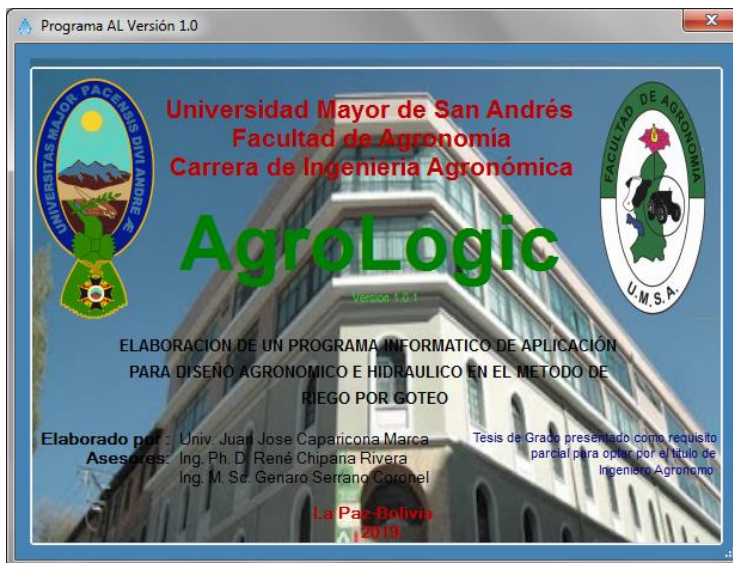
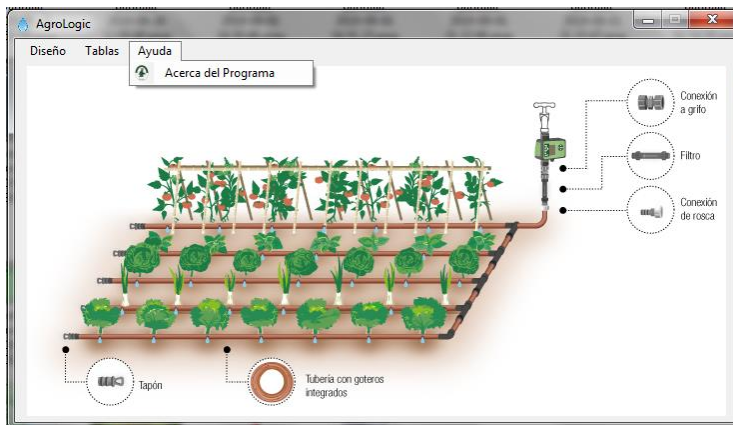
- Aliaga F; Castelo P; Condori N; Espinosa J; Flores M; Lopez C; Mamani J; Montevilla V; Quispe M; Reinaga A; Ruiz M; Tazola V (2009). Riego por Goteo, en cultivos agrícolas de *Allium Ceparosacea*, *Prunus persicum*. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de técnica, instituto de Investigaciones y aplicaciones tecnológicas (IIAT). La Paz – Bolivia.
- Ameller A. (2001). Desarrollo de un software para diseñar sistemas de riego por aspersión (Tesis de grado). Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía, Carrera de Ingeniería Agronómica. La Paz – Bolivia.
- Amoros M. (2000). “Riego por goteo en cítricos”, Agroguías Mundi-Prensa, Ediciones Mundi-Prensa, España.
- Butron C. (2017). Calibración de la ecuación FAO Penman Monteith para calcular la evapotranspiración de referencia Eto en condiciones de invernadero en el centro experimental Cota cota. (Tesis de grado). Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía, Carrera de Ingeniería Agronómica. La Paz – Bolivia.
- Carrazón J, (2007), “Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego”, Programa especial para la seguridad alimenticia (PESA), Honduras, 218 pp.
- Chambleyron J. (1993). Diseño y evaluación del riego presurizado. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. La Paz – Bolivia.
- Chow J, (S. F). “Cálculos de requerimientos de riego”, Recuperado de: [http://www.riego.elesteliano.com/ayuda/Fto2\\_Requerimientos\\_de\\_riego.htm](http://www.riego.elesteliano.com/ayuda/Fto2_Requerimientos_de_riego.htm)
- Chipana R. (2003). “Principios de riego y drenaje”. Facultad de Agronomía UMSA La Paz- Bolivia.
- Escuela Agrícola Panamericana (2012), “Bachillerato técnico en agricultura módulo 5 manual de riego y drenaje”. Carrera de ciencia y producción agropecuaria, El Zamorano Honduras 117 pp,

- Facultad de agronomía UMSA (2015). “Memoria Institucional Gestión 2012 - 2015”  
Facultad de Agronomía UMSA. La Paz-Bolivia, 134 pp.
- Fernández G. R. (2010). “Manual de riegos para agricultores módulo 1 fundamentos del riego” junta de Andalucía. Instituto de investigación y formación agraria y pesquera. Sevilla España.
- Fernández G. R. (2010). “Manual de riegos para agricultores módulo 3 riego por aspersión” junta de Andalucía. Instituto de investigación y formación agraria y pesquera. Sevilla España.
- Fernández G. R. (2010) “Manual de riegos para agricultores módulo 4 riego localizado” junta de Andalucía, Instituto de investigación y formación agraria y pesquera, Sevilla España.
- Franco A. Pérez L. (2007-2008). “Hidráulica y riegos”. Universidad de Sevilla, Enseñanza virtual, Sevilla España disponible en: <http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/material-de-clase-1/>
- García J. (1999). “Aprenda Visual Basic 6,0 como si estuviera en primero”. Escuela Superior de Ingenieros Industriales de San Sebastián. Universidad de Navarra.
- Luna D. (2006). “Introducción al riego presurizado y diseño de riego de un sistema de riego por aspersión”. Parte I. Programa de Post Grado en gestión Integral de recursos Hídricos – UMSS. Cochabamba – Bolivia. 38 pp.
- Luna F, 2010 “Visual Basic guía definitiva del programador”, RED USERS, Buenos Aires, Argentina disponible en: <http://www.freelibros.org/manual/visual-basic-guia-definitiva-del-programador-users.html>
- Medrano R. (2006) Influencia de la frecuencia de riego por goteo en la calidad de la producción del clavel (*Dianthus cariophyllus*) comercial bajo carpa solar. (Tesis de Grado). Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía, Carrera de Ingeniería Agronómica. La Paz – Bolivia.

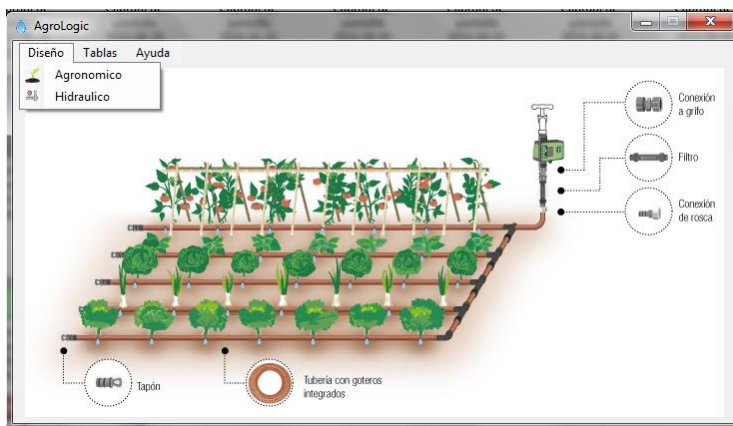
- Mendoza A. (2013). "Riego por goteo" Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y forestal. El Salvador. (Tesis de grado).
- Palomino K. (2007). "Riego por Goteo" Colección de agricultura tecnificada. Empresa editora MACRO. Perú. 96 pp.
- Prieto D. (11 – 14/08/2008). Riego con aguas salinas y aguas de drenaje, control de impacto de salinidad, Jornadas sobre ambiente y riegos modernización y ambientabilidad. MDA, CYTED y AECID curso 14, 40 pp. Recuperado de <http://studylib.es/doc/5351984/riego-con-aguas-salinas-y-aguas-de-drenaje--control-de-im...>
- Quinde P. (2014), Variación de viscosidad con la temperatura, Presentación Prezi, disponible en: <https://prezi.com/4tuikzcrhlzw/variacion-de-la-viscosidad-con-la-temperatura/>
- Ríos B. (2014). "Diagramas de flujo volumen 1" 2da ed. Facultad de Ciencias Puras. Carrera de Informática UMSA. La paz Bolivia.
- Ríos B. (2014). "Diagramas de flujo volumen 2" 2da ed. Facultad de Ciencias Puras, Carrera de Informática UMSA. La Paz Bolivia.
- Serrano G. (2014), "Ingeniería del riego tecnificado" Primera Edición. Universidad Pública del El Alto. La Paz Bolivia.
- Serrano G. (2015). Diplomado en formulación y evaluación de proyectos de riego presurizado. Segunda Versión, planificación y diseño en riego Presurizado. Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de agronomía. La Paz – Bolivia.
- Serrano G. (2018). "Ingeniería del Riego y Drenaje", Segunda Edición, Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía, La Paz Bolivia.
- Tarjuelo M. (2010). "El riego y sus tecnologías" CEER centro de engenhaira dos biosistemas, instituto superior de agronomía, universidad técnica de Lisboa Tapada da Ajuda, Lisboa Portugal. 296 pp.
- Veintimilla M. (2013). "Software Aqua", Software para diferentes cálculos de riego. Guayaquil – Ecuador. 174 pp.

# ANEXOS

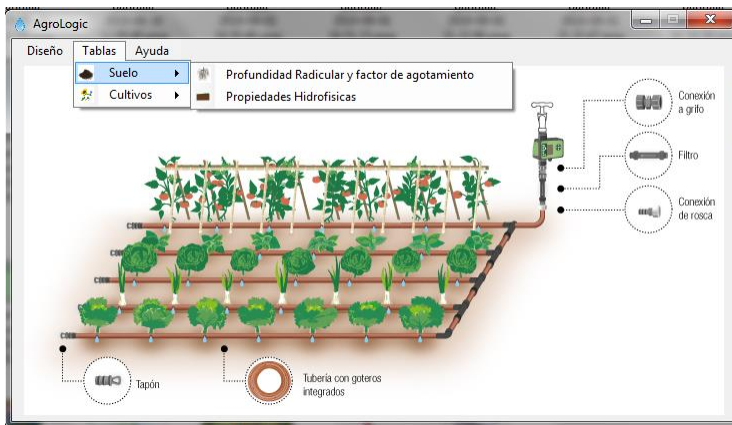
## ANEXO 1. Acerca del programa.



## ANEXO 2. Selección del diseño.



### ANEXO 3. Selección de la tabla del suelo.



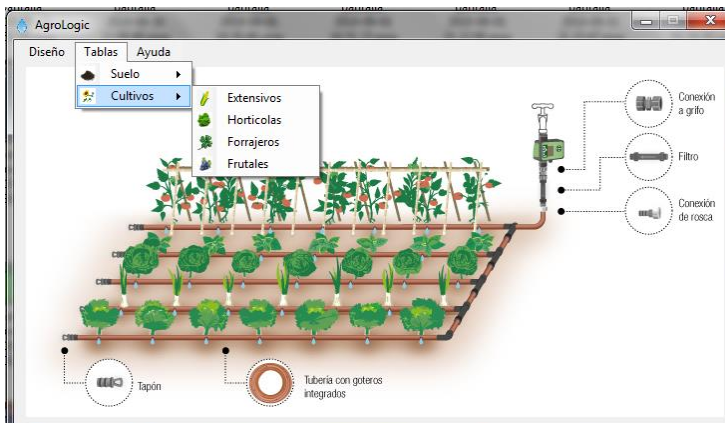
### ANEXO 4. Tabla de profundidad radicular y factor de agotamiento (suelo).

Cultivo			
	Cultivo	f	Prof. (m)
▶	Apio	0,2	0,4
	Cebolla	0,3	0,4
	Espinaca	0,2	0,3
	Lechuga	0,3	0,3
	Papa	0,35	0,6
	Zanahoria	0,35	0,4
	Arveja	0,45	0,6
	Col	0,45	0,4
	Brocoli	0,45	0,4
	Frigol	0,45	0,5

### ANEXO 5. Propiedades hidrofísicas (suelo).

Propiedades Hidrofísicas					
Suelo					
	Textura	Ucc (%)	Upmp (%)	Dap (gr/cc)	lb (mm/hr)
▶	A	7,01	3,51	1,71	9
	AF	9,2	4,91	1,63	4,5
	FA	13,46	6,41	1,56	3
	F	21,27	10,64	1,41	1,5
	FL	23,07	9,09	1,43	1,4
	L	21,05	5,92	1,52	1,15
	FYA	22,14	14,29	1,4	2,5
	FY	28,78	16,67	1,32	1,25
	FYL	33,85	18,11	1,27	0,75
	YA	28,35	20,15	1,34	1,65
	YL	40,49	25,62	1,21	0,5
	Y	42,5	30,83	1,2	0,15

## ANEXO 6. Selección de la tabla cultivo.



## ANEXO 7. Cultivos de forraje.

Cultivos de Forraje						
	Cultivo	Cees (100%)	Cees (90%)	Cees (75%)	Cees (50%)	Cees (Max)
	Cebada	6	7,4	9,5	13	20
	Maiz	1,8	3,2	5,2	8,6	16
	Centeno	5,6	6,9	8,9	12,2	19
	Pasto Judan	2,8	5,1	8,6	14,4	26
	Trebol Grande	2,3	2,8	3,6	4,9	8
	Trebol Pequeño	5	6	7,5	10	15
	Trebol Forrajero	7,5	9	11	15	22

## ANEXO 8. Cultivos hortícolas.

Cultivos Hortícolas						
	Cultivo	Cees (100%)	Cees (90%)	Cees (75%)	Cees (50%)	Cees (Max)
	Judias Verde	1	1,5	2,3	3,6	7
	Remolacha Huerta	4	5,1	6,8	9,6	15
	Coles	1,8	2,8	4,4	7	12
	Melon	2,2	3,6	5,7	9,1	16
	Pepino	2,5	3,3	4,4	6,3	10
	Lechugas	1,3	2,1	3,2	5,2	9
	Cebollas	1,2	1,8	2,8	4,3	8
	Pimientos	1,5	2,2	3,3	5,1	9
	Patatas	1,7	2,5	3,8	5,9	10
	Espinacas	2	3,3	5,3	8,6	15
	Maiz Dulce	1,7	2,5	3,8	5,9	10
	Fresa	1	1,3	1,8	2,5	4
	Tomates	2,5	3,5	5	7,6	13
	Alfalfa	2	3,4	5,4	8,8	16



**ANEXO 9. Cultivos frutales**

Frutales						
Cultivos Frutales						
Cultivo	Cees (100%)	Cees (90%)	Cees (75%)	Cees (50%)	Cees (Max)	
Albaricoquero	1,6	2	2,6	3,7	6	
Aguacate	1,3	1,8	2,5	3,7	6	
Vid	1,5	2,5	4,1	6,7	12	
Almendro	1,5	2	2,8	4,1	6,7	
Manzano y Peral	1,7	2,3	3,3	4,8	8	
Limonero	1,7	2,3	3,3	4,8	8	
Naranja	1,7	2,3	3,2	4,8	8	
Melocotonero	1,7	2,2	2,9	4,1	7	
Ciuelo	1,5	2,1	2,9	4,3	7	
Nogal	1,7	2,3	3,3	4,8	8	

**ANEXO 10. Cultivos extensivos.**

Extensivo						
Cultivos Extensivos						
Cultivo	Cees (100%)	Cees (90%)	Cees (75%)	Cees (50%)	Cees (Max)	
Cebada	8	10	13	18	28	
Judias Grano	1	1,5	2,3	3,6	7	
Habas Grano	1,6	2,6	4,2	6,8	12	
Maiz	1,7	2,5	3,8	5,9	10	
Algodón	1,7	9,6	12	17	27	
Cacahuate	3,2	3,5	4,1	4,9	7	
Arroz	3	3,8	5,1	7,2	12	
Sorgo	4	5,1	7,2	11	18	
Soja	5	5,5	6,2	7,5	10	
Remolacha Azucarera	7	8,7	11	15	24	
Trigo	6	7,4	9,5	3	20	