



UNIVERSIDAD DE ORIENTE

FACULTAD DE CONSTRUCCIONES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

Título:

Consideraciones sobre la asignatura Ingeniería de
Riego.

Autor:

Orlando David Serrano Pavón.

Tutor:

Dr. C. Pável Vargas Rodríguez.

Ing. Abel Dorta Armaignac.

JULIO 2020

PENSAMIENTO

“En los pueblos que han de vivir de la agricultura, los gobiernos tienen el deber de enseñar preferentemente el cultivo de los campos. Se está cometiendo en el sistema de educación en la América Latina un error gravísimo: en pueblos que viven así por completo de los productos del campo, se educa exclusivamente a los hombres para la vida urbana, y no se le prepara para la vida campesina ”

José Martí.

DEDICATORIA

A mis abuelos Enma y Juan por ser las dos personas más importantes de mi vida, les doy las gracias por haberme acogido como otro hijo.

A mi madre que a pesar que la vida no me dio la oportunidad de escuchar sus consejos, sé que siempre está a mi lado guiándome en cada paso.

A mi tía Maribel y mi papa por entregar todo lo posible y lo imposible por mí, por haberme guiado por el camino correcto, por haber hecho de mí un profesional.

AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar, agradezco a mi madre por haberme dado la vida
prácticamente a cambio de la suya.*

*A mi tía Maribel y a mi abuela Enma por ser las personas que asumieron el
papel de madre.*

A mi padre por todo el apoyo y preocupación.

*A mis hermanos Jose Carlos, Adriana Caridad y Carlos Adrian por su
preocupación en estos 5 años.*

De manera general agradezco a toda mi familia

*A mi tutor el Dr. C. Pável Vargas Rodríguez por su preocupación y
dedicación para la culminación de este Trabajo de Diploma.*

*A mis mejores amigos Celia Rosa y Michel Velázquez por su
incondicional apoyo en todo momento.*

*A mis compañeros y amigos del aula en especial, Javier, Ernesto, Jose
Luis, Carlos, Adrian, Reinier, Gilbert, Josué por ser los que estuvieron
presentes en todo momento a lo largo de estos 5 años en los que compartimos
buenos y malos momentos de los cuales salimos victoriosos.*

RESUMEN

Para reajustar la asignatura de Ingeniería de Riego al nuevo Plan de Estudio E, por el que transita la carrera de Ingeniería Hidráulica, se concibió la realización de este trabajo de diploma. El mismo tiene como objetivo general proponer el Programa Analítico de la asignatura Ingeniería de Riego, así como describir el estado actual del arte de los sistemas de riego presurizados que actualmente se introducen en la agricultura cubana. Se realizó una exhaustiva Revisión Bibliográfica que aborda el dimensionamiento de sistemas de riego por aspersión y localizado, en sus técnicas más utilizadas, con un enfoque práctico muy similar al utilizado en las Empresas de Consultoría y Diseño del Ministerio de la Agricultura. En el trabajo se actualizan los procedimientos de diseño de las técnicas de riego que componen este método distribución y aplicación de agua a las plantas, desde el punto de vista docente se contribuye a incrementar el rigor de la docencia que se imparte en la Disciplina Riego y Drenaje, como complemento de la Investigación, se presentan varios ejercicios resueltos y propuestos, soportados en Microsoft Excel que propician el desarrollo de las habilidades en el diseño por parte de los estudiantes.

ABSTRACT

In order to readjust the Irrigation Engineering subject to the new Study Plan E, through which the Hydraulic Engineering degree passes, the completion of this diploma work was conceived. The general objective is to propose the Analytical Program of the Irrigation Engineering subject, as well as to describe the current state of the art of pressurized irrigation systems that are currently being introduced in Cuban agriculture. An exhaustive Bibliographic Review was carried out, addresses the dimensioning of sprinkler and localized irrigation systems, in their most used techniques, with a practical approach very similar to that used in the Consulting and Design Companies of the Ministry of Agriculture. In the work, the design procedures of the irrigation techniques that including in this method of distribution and application of water to the plants are updated, from the teaching point of view it contributes to increasing the rigor of teaching that is taught in the Irrigation and Drainage Discipline, as a complement to the Research, several resolved and proposed exercises are presented supported in Microsoft Excel, that promote the development of design skills by students.

ÍNDICE	Página
Introducción.....	1
I.- Revisión bibliográfica.	
I.1.-Generalidades de los sistemas de riego.....	6
I.1.1.-Antecedentes y evolución de los sistemas de riego.....	6
I.1.2.-Importancia de los sistemas de riego.....	8
I.2.-Definición de los sistemas de riego presurizados.....	9
I.2.1.-Clasificación.....	10
I.2.2.-Componentes.....	11
I.3.-Características de los sistemas de riego presurizados.....	13
I.3.1.-Ventajas e Inconvenientes.....	26
I.4.-Particularidades del diseño de los sistemas de riego presurizado.....	28
I.4.1.-Fundamento teórico del diseño.....	43
I.5.-Normas y Regulaciones consideradas en la práctica del diseño.....	48
I.6.-Criterios de Selección según complejo Agua – Suelo – Planta – Clima.....	49
II.-Procedimientos de diseño de sistemas de riego presurizado.	
II.1.-Cálculo de la Necesidades de agua con riego presurizado.....	53
II.2.-Procedimiento para el diseño agronómico.....	69
II.3.-Procedimiento para el diseño hidráulico.....	94
III.-Consideraciones sobre la impartición de la asignatura Ingeniería de Riego.	
III.1.-Programa Analítico de la signatura Ingeniería de Riego.....	107
III.2.-Ejercicios resueltos.....	117
III.3.-Ejercicios propuestos.....	140
CONCLUSIONES.....	142
RECOMENDACIONES.....	143
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	144
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

Desde el surgimiento de la vida humana, la agricultura ha jugado un papel muy importante para la subsistencia del hombre. Cuando las precipitaciones no son suficientes ni frecuentes es necesario que las plantas reciban una dosis adicional de agua para su crecimiento, desarrollo y la obtención de altos rendimientos, un método muy antiguo era el de aplicar el agua a las plantas por medio de regaderas o cubetas de riego, pero el mismo fue restringiendo su uso debido a lo trabajosas y extensas que se tornaban las labores en la medida que las áreas eran mayores.

Esta situación, unida al incremento de la población, la proliferación de conflictos bélicos y otros elementos, influyó en el surgimiento de los primeros sistemas de riego. Con el transcurso de los años se establecieron los llamados métodos tradicionales o convencionales de riego tales como: Riego Superficial y Riego por Aspersión, posteriormente se desarrolló el más joven y discutido de todos, el método de Riego Localizado.

La importancia de los sistemas de riego ha quedado confirmada en la actualidad y la tendencia mundial se caracteriza por el incremento de las áreas bajo riego en el mundo, debido al papel que representa la Agricultura de Regadíos como proveedora de alimentos y generadora de empleo. En unos pocos países se ha dispuesto el desarrollo científico y tecnológico para desarrollar tecnologías de riego cada vez más productivas y eficientes, debido a las implicaciones que representa la Agricultura como gran consumidora de agua y otros recursos naturales a escala mundial y las consecuencias que su utilización comercial sobre bases no científicas ha provocado en el clima del planeta.

En los países en vías de desarrollo como Cuba, este renglón económico es prioritario, debido a que puede constituir una opción viable para garantizar alimentos sin tener que destinar cuantiosos recursos financieros para adquirirlos en el exterior. En este sentido, en Cuba se han establecido desde los primeros años del triunfo revolucionario, varias Empresas y Organismos encargados de gestionar los recursos naturales necesarios para desarrollar los sistemas de riego en la Agricultura, en particular el agua, el cual constituye un recurso deficitario, agravado aún más por la condición insular del país.

Además de lo anterior, por tratarse de un país bloqueado y de insuficientes recursos financieros, se hace más complejo el acceso a las modernas tecnologías de riego, en la

actualidad, las mismas son introducidas al país, generalmente a partir de donaciones y créditos blandos obtenidos al amparo de convenios de colaboración con otros países. En este contexto los Ingenieros Hidráulicos son los profesionales encargados de asimilar y aplicar adecuadamente estas modernas tecnologías en las Empresas Agrícolas comprometidas con la entrega de alimentos a la población.

Este propósito justifica la presencia de la Disciplina Riego y Drenaje dentro del currículo de asignaturas de la especialidad de Ingeniería Hidráulica, la cual transita en la actualidad por el Plan de Estudios E, con un significativo componente no presencial y apoyado necesariamente en la interacción con los principales organismos de la administración central del estado (OACEs), quiénes a su vez constituyen sus principales usuarios. El vínculo Universidad vs Empresas del territorio constituye un aspecto clave en el éxito de este nuevo plan de estudios que prevé la formación de profesionales competitivos para asumir el desarrollo del país en solamente 4 años.

En ese sentido garantizar la calidad del graduado constituye una de las claves en el camino al éxito del Programa Alimentario que desarrolla la dirección del país y para lograrlo es necesario adaptar los nuevos contenidos de la Disciplina Riego y Drenaje al limitado fondo horario convenido en el nuevo Plan de Estudios “E”. En el caso particular de la asignatura Ingeniería de Riego, las transformaciones en el fondo de tiempo establecidas en la misma **(64 horas)** y el hecho de no disponer de un texto básico actualizado con las nuevas tecnologías de riego, justifican la aplicación de modificaciones en la selección de los contenidos a impartir.

Esto se hace más evidente con el fomento de nuevos Polos Productivos en las diferentes provincias que abarcan el territorio oriental, en los cuales se ha identificado una extensa área agrícola potencialmente útil para la introducción de las nuevas tecnologías de riego que ha planificado la dirección del país, en su noble empeño de garantizar la alimentación del pueblo.

En los anteriores párrafos se resume la situación Polémica que enmarca el presente Trabajo de Diploma y conlleva a identificar en la siguiente interrogante el **Problema de Investigación**: ¿cómo incrementar la pertinencia del sistema de contenido y habilidades de la asignatura Ingeniería de Riego de manera compatible a las exigencias en el diseño de las tecnologías actuales de riego presurizado? Como **Objeto de la Investigación** se identifican,

las características y particularidades de las tecnologías de riego presurizado que están siendo introducidas en las Empresas Agropecuarias, así como los fundamentos teóricos de su diseño. Específicamente los contenidos que abordan los procedimientos para los diseños agronómicos e hidráulicos de los principales componentes de los sistemas de riego presurizados constituyen el **Campo de Acción de la Investigación**

En este sentido la presente investigación se plantea la siguiente **Hipótesis**: Si se incrementa el rigor del sistema de contenidos y habilidades de la asignatura Ingeniería de Riego, de acuerdo a las particularidades de las tecnologías de riego presurizado que se están introduciendo en las Empresas Agropecuarias, se contribuye a incrementar la competitividad de los egresados de la Especialidad de Ingeniería Hidráulica en la región oriental de Cuba.

Para demostrar la misma el **Objetivo General** se concreta en elaborar el Programa Analítico de la asignatura Ingeniería de Riego, sustentado un sistema de conocimientos y habilidades que tenga en cuenta las exigencias del diseño de las actuales tecnologías de riego presurizado que se introducen en la Empresas Agropecuarias

En este contexto, la pretensión conlleva a cumplir un grupo de **Objetivos Específicos**, relacionados con:

1. Describir el estado actual del arte de las tecnologías de riego presurizado introducidas en las Empresas Agropecuarias y el fundamento teórico para su diseño.
2. Caracterizar los procedimientos para el diseño agronómico e hidráulico de los sistemas de riego presurizados que actualmente se introducen en la agricultura cubana.
3. Proponer el Programa Analítico de la asignatura Ingeniería de Riego.

Aportes:

Desde el punto de vista Metodológico en el trabajo se aborda el dimensionamiento de sistemas de riego por aspersión y localizado, en sus variantes más utilizadas en la Empresas Agropecuarias Cubanas, con un enfoque práctico muy similar al utilizado en las Empresas de Consultoría y Diseño del Ministerio de la Agricultura y a pesar de que no alcanza el rigor técnico habitual entre los profesionales de estas empresas, debido a los inconvenientes que plantea la utilización de software profesionales para la realización de algunos diseños, el trabajo actualiza los procedimientos de diseño que se utilizan en la

actualidad no solamente en Cuba sino también en muchos países que presentan una agricultura más desarrollada.

Desde el punto de vista docente contribuye a incrementar el rigor de la docencia que se imparte en la Disciplina Riego y Drenaje de la carrera de Ingeniería Hidráulica.

ESTRUCTURA GENERAL DEL TRABAJO DE DIPLOMA:

En la primera parte del trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Hidráulico se compila información relacionada con la presentación de la tesis. Se incluyen entre otros, la portada de la tesis, un breve **RESUMEN** con la síntesis del trabajo donde se reflejan los aspectos más relevantes del mismo: el objeto de trabajo, objetivo fundamental, y los principales resultados alcanzados, haciendo énfasis en la relevancia del mismo. Seguidamente y a modo de **INTRODUCCIÓN** se considera la fundamentación científica del trabajo con los aspectos de diseño de la investigación que contribuyen a dar solución al problema que se plantea y donde se especifican entre otros los Objetivos a seguir y la Hipótesis a demostrar como solución al Problema de la Investigación. La tesis cuenta además con tres capítulos. En la **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA** se resume el estado del arte sobre las tecnologías de riego presurizado introducidas en las Empresas Agropecuarias, teniendo en cuenta los elementos que, en opinión del autor, son los de mayor relevancia para la asimilación de los contenidos por parte de los estudiantes de la especialidad de Ingeniería Hidráulica, así como el fundamento teórico del diseño de las mismas. Se relacionan en este capítulo: las Normas Cubanas, y algunas Regulaciones referidas al diseño de sistemas de riego.

En el capítulo dedicado a los **PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO**, se caracterizan las particularidades tecnológicas de cada una de las técnicas de riego que se utilizan en la práctica agrícola cubana, así como, se exponen los procedimientos para el diseño agronómico e hidráulico de las técnicas de riego presurizadas que más comúnmente se utilizan en el sistema de la agricultura cubano. En el capítulo dedicado a las **CONSIDERACIONES SOBRE LA IMPARTICIÓN DE LA ASIGNATURA INGENIERÍA DE RIEGO** se presenta el Programa Analítico de la asignatura Ingeniería de Riego, en el cual se destaca la distribución del sistema de contenidos y habilidades en el fondo horario de la asignatura y el calendario de las actividades teóricas, prácticas y evaluativas planificadas. Como complemento a este capítulo se ofrecen en los ANEXOS,

ejercicios resueltos y ejercicios propuestos que ayudan a una mejor asimilación de los contenidos por parte de los estudiantes. Finalmente se enfocan las **CONCLUSIONES** del Trabajo, referidas a los objetivos propuestos inicialmente y la hipótesis planteada en el mismo, así como las principales **RECOMENDACIONES** que contribuyen a su continuidad en posteriores trabajos. De igual forma se resumen las principales **BIBLIOGRAFÍAS CONSULTADAS** y que constituyeron el objeto y campo de acción de la investigación bibliográfica realizada.

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

I.1.- Generalidades de los sistemas de riego.

No se puede entender la agricultura sin el agua, en realidad sin ella ni siquiera la vida es posible. Por eso agua y agricultura son dos palabras necesariamente ligadas incluso sin hacer referencia directa a lo que hoy se entiende por regadío. Los agrónomos de todos los tiempos han tratado de cuantificar las necesidades de agua de las plantas a partir de este doble papel, de constitución y de transporte que desempeña, (Del Castillo, 1997).

I.1.1.- Antecedentes y evolución de los sistemas de riego.

El arte de regar es antiquísimo. Civilizaciones enteras han florecido y se han extinguido sobre tierras regadas. Su desarrollo se remonta a las civilizaciones surgidas en los valles fértiles de los ríos Yang Tse, Hoang Ho, Indo, Nilo, Eufrates, Amu-Darí, Sir-Darí y otros. Egipto reclama poseer la presa más antigua del mundo, el sistema de riego instalado en el Nilo hace más de 5000 años, todavía desempeña un papel importante en la agricultura egipcia. Hammurabi, sexto rey de la primera dinastía babilónica, promulgó el llamado código de Hammurabi hace unos 4000 años y de cuyo contenido se deduce que la existencia del pueblo dependía del riego.

En Irak están localizados los famosos valles de los ríos Tigris y Eufrates, en un área que soportó una civilización antiquísima, la cual dependía del regadío. Desde hace 2500 años en Irán se utilizan galerías subterráneas para recoger las aguas freáticas para el riego. En China, hace más de 4000 años, el pueblo eligió como rey a Yu, a causa de una labor desarrollada en el campo de la regulación de las aguas.

Cuando los españoles llegaron por primera vez a México y Perú en el siglo XVI, descubrieron que existían instalaciones de riego de cierta complejidad, debido a la necesidad de ahorrar agua, principalmente la que se utilizaba para riego en zonas desérticas y semidesérticas, en donde además de los problemas generados por las sequías, el uso agrícola llegaba a ser hasta más del 85 % del volumen total de agua utilizado. Esto hacía muy importante desarrollar sistemas de riego de alta eficiencia y sencillos, que permitieran aprovechar mejor el agua disponible.

En este punto de la historia, el desarrollo agrícola radicaba en una serie de técnicas para manejar el agua de riego a través de los sistemas de distribución y en la construcción de terrazas de cultivo. Se desarrollaron tecnologías enfocadas a mitigar los efectos de la erosión, aminorar las inundaciones, retener humedad, y permitir captaciones, traslados y

almacenamientos. Por otro lado, en la cultura azteca proliferó el cultivo por chinampas, que consistía en una construcción de campos elevados dentro de una red de canales dragados sobre el lecho del lago. Así se reciclaban los nutrientes arrastrados por las lluvias.

De acuerdo con (Del Castillo, 1997), se considera que de forma incipiente y solo por intuición en los albores de la actual civilización, se comprende la necesidad de suplementar el agua de lluvia, mediante el riego para la obtención de mejores cosechas, desarrollándose diferentes técnicas de riego, sobre todo, en la cuenca mediterránea, donde por ser escasa la precipitación, siempre era necesario un complemento de agua para la obtención de buenas cosechas.

Los adelantos tecnológicos del siglo XX proporcionaron avanzados sistemas de riego básicamente más eficientes que las técnicas de riego superficiales. El método de riego por aspersión representó un avance en la tecnología del riego, en el cual, el agua se distribuye a presión por una conducción a sección llena y se aplica a los cultivos por medio de dispositivos de emisión de caudal del tipo aspersor, que aplican el agua en forma similar a las precipitaciones.

Su utilización en los regadíos aumentó espectacularmente en poco tiempo, debido a su mayor adaptabilidad en terrenos con relieve y propiedades físicas no asimilables para los riegos de superficie, (G., 1991). El riego por aspersión ha asimilado una serie de modificaciones en función de las variaciones tecnológicas y por tanto las producidas en los parámetros que intervienen en su diseño, manejo y costo de inversión y han dado lugar a diferentes técnicas para aplicar el agua a los cultivos con una mayor eficiencia, no obstante, sigue manteniéndose el concepto de que se requieren grandes cantidades de agua para mantener la vida de los cultivos,.

Hasta donde se conoce la concepción del método de riego localizado de alta frecuencia (RLAF) se debe a Israel, aunque existen algunos bibliógrafos que plantean que el Riego Localizado se utilizó por primera vez en Inglaterra al final de la década del 40 y que posteriormente se implanto en tierras israelitas en la década de los 50. No obstante es precisamente este país uno de los que más ha avanzado en el tema, considerándose por muchos autores, los creadores de este método de riego. Su importancia comercial se desarrolla en la década de los 60 a continuación de los trabajos de puesta a punto realizados en esta nación árabe y de la aparición de las tuberías de material plástico de bajo costo. Las

primeras aplicaciones en parcelas se realizaron regiones desérticas donde los métodos clásicos daban resultados poco satisfactorios debido a la naturaleza del suelo y de las aguas. En estas condiciones los sistemas de RLAF han dado resultados muy esperanzadores en relación con los sistemas de riego superficiales o por aspersión, por otra parte, estos sistemas despiertan un gran interés por méritos propios ya que aparecen como oponentes potenciales a los métodos clásicos o convencionales de riego superficial y por aspersión.

I.1.2.- Importancia de los sistemas de riego:

El crecimiento demográfico y la satisfacción de las necesidades de alimentos para la humanidad, imponen el desarrollo rápido del riego en todo el mundo, si bien es cierto que la misma reviste gran interés para las regiones áridas, no hay que olvidar el papel cada vez más importante que desempeña en las regiones húmedas.

De acuerdo con estos autores, el riego es uno de los recursos fundamentales del futuro para la producción de alimentos, el cual no sólo permite elevar considerablemente el rendimiento de los cultivos, sino también *estabilizar* la producción agrícola, siendo de gran necesidad para los países en vías de desarrollo. El papel de los sistemas de riego a nivel mundial es cada día más necesario e importante, más si se tienen en cuenta los resultados de las últimas investigaciones respecto al incremento de la producción de alimentos en las zonas desérticas y semidesérticas.

El incremento de las cosechas de los cultivos es reducido, generalmente, por causa de las sequías. Donde es disponible el empleo de la irrigación, en primavera, las cosechas pueden incrementarse y la eficiencia del uso del agua para la irrigación es mayor, la irrigación es la aplicación oportuna, uniforme y suficiente de agua al suelo en el espesor de las raíces o rizosfera, para reponer el agua absorbida por las plantas, evapotranspirada desde el suelo a las hojas, o infiltrada a las capas más profundas, entre dos riegos consecutivos, con el fin de que los cultivos se desarrollen bien.

El agua escasea no solo en regiones con presencia de sequía meteorológica y/o agrícola, sino también en regiones con precipitaciones abundantes. La aplicación del agua por medio de la irrigación en zonas con escasez de agua requiere de enfoques innovadores y sostenibles.

Tomando en cuenta que el agua es un recurso limitado, su utilización eficiente es una necesidad impostergable. De aquí la necesidad de aplicar tecnologías de riego de avanzada para el beneficio de los cultivos agrícolas que contribuyan a la producción de alimentos para una población en aumento.

Corroborando lo anteriormente planteado, pues refiere que la economía del agua se ve afectada por dos causas esenciales, las altas necesidades de irrigación y la creciente demanda de la población, la población ha crecido, la rural ha ido a las ciudades debido a muchos factores. La agricultura debe potenciar a quienes usan el agua para regar sus cultivos, planificando y desarrollando políticas capaces de ahorrar el agua de riego, los problemas locales y aspectos socioeconómicos referidos al agua de riego deben ser enfocados por los futuros trabajos de investigación.

Probablemente la producción de los cultivos plantados en zonas tropicales sea restringida por la provisión de agua y ésta afecta la eficiencia del uso del agua y por ende detiene o disminuye la actividad de las raíces y de las hojas, en los cultivos., que la falta de agua puede limitar o frenar el desarrollo económico en naciones cuyo desarrollo depende de lo que pueda hacerse empleando el recurso agua para aumentar los beneficios.

De forma general los sistemas de irrigación y las precipitaciones durante el período de crecimiento de los cultivos suministran la mayor parte del agua en la tierra para el adecuado proceso de evapotranspiración en las plantas, especialmente en los años más secos. La combinación de irrigación y una capa de abono orgánico encima del suelo plantado, puede incrementar la temperatura del suelo reduciendo el déficit de agua, lo que significa que esta combinación facilita el incremento de las cosechas en zonas semiáridas. (Li, 2003)(Li, 2004) Desde 1980, en todo el mundo fue desarrollándose el riego como una ciencia evolutiva de tal manera que las técnicas de riego, son cada vez mejores año con año, ya que conjuntan ahorro de agua, ahorro de energía y al ser extensivas abaratan los costos y conllevan un aumento en la producción importante. En ésta época se introducen técnicas de fertilización y aplicación de químicos a través del riego, lo que se ha denominado fertirrigación y quimigación. Esta práctica ha desencadenado una alta productividad en los cultivos y ha hecho más eficiente el uso de los recursos, aunque su utilización incontrolada puede provocar efectos negativos en las propiedades agroproductivas de los suelos.

I.2.- Definición de los sistemas de riego presurizados.

El riego presurizado se refiere a ambos, el riego por aspersión y el riego localizado, conteniendo todas las técnicas de riego que se incluyen en cada uno de estos métodos. Se considera que el riego es presurizado cuando el agua es conducida a sección llena y a una presión mayor que la atmosférica, por diferentes tuberías y/o mangueras que las distribuyen hacia los dispositivos de emisión, desde los cuales el agua se aplica a los cultivos a través de los orificios de salida, a cierta velocidad, (www.agro-tecnologia-tropical.com).

El método RLAF consiste en aplicar agua al suelo a muy bajos caudales, a través de un sistema de tuberías plásticas de pequeños diámetros en los cuales están fijos los emisores, estos llevan el agua muy cerca de las plantas de forma que solo se humedezca una porción del suelo en la cual se desarrollan la mayoría de las raíces, con esto se pretende que estas obtengan de este pequeño volumen aplicado de agua los nutrientes que necesitan para su desarrollo, (López, 1997).

El riego por aspersión es la aplicación artificial en forma de lluvia que se le aplica al cultivo para obtener altos rendimientos y óptima calidad comercial. (Martín-Benito, 2005).

I.2.1.- Clasificación.

Clasificación de los sistemas de riego presurizados: Varios autores han clasificados los métodos de riego, considerando para ello determinados criterios. Sin embargo, la propia evolución tecnológica de los regadíos a nivel mundial ha conllevado a la existencia de varias clasificaciones en literatura especializada. Desde el punto de vista docente se ha preferido seleccionar para este informe aquella que más se adapta a las características del sistema de la Agricultura cubana actual y que tiene en cuenta las actuales tecnologías de riego importadas e introducidas en las Empresas Agropecuarias de Cuba. La Tabla 1 que le sigue, resume la clasificación del método de riego presurizado para uso docente.

Tabla 1: Clasificación de los métodos de riego presurizados.

Métodos de riego presurizado				
Método de riego por aspersión.		Método de riego localizado de alta frecuencia.		
Técnicas de riego por aspersión convencional.	Técnicas de riego por aspersión mecanizado.	Goteo.	Microaspersión.	Exudación
Móviles	Pivote central	Subterráneo	Difusores	Mangueras porosas
Semifijas	Lateral de avance frontal	Superficial	Microaspersores	Cintas exudantes
Fijas	Enrolladores			

I.2.2.- Componentes de un sistema de riego presurizado, (Martín-Benito, 2005).

Fuente de abasto: Puede consistir en un pozo, embalse, río, canal etc. Es fundamental conocer el caudal que puede suministrar la fuente de abasto en forma continua sin agotar la misma, así como evaluar su calidad para conocer su compatibilidad con el cultivo, el suelo y con la técnica de riego a emplear.

Equipo de impulsión: Este tiene por objetivo aspirar el agua desde la fuente de abasto e impulsarla a través de un sistema de tuberías con presión suficiente para hacer funcionar los aspersores o emisores según se trate de un sistema de riego por aspersión o localizado. También es el encargado de compensar las pérdidas de energía en las tuberías, los desniveles del relieve y las actividades propias del manejo del riego que utilizan agua presurizada. El tipo de bomba depende de las características de la fuente de abasto y de otros parámetros, generalmente se utilizan bombas centrifugas, pudiendo ser accionadas por motores eléctricos o por motores a combustión interna.

Tuberías: Las tuberías permiten conducir el agua desde el equipo de impulsión hasta los dispositivos de emisión del caudal. De acuerdo a la función que cumplen dentro de la red hidráulica se distinguen:

1. Tuberías principales (TP), se colocan mayormente soterradas y se construyen de diferentes materiales como pueden ser fibrocemento, hierro y otros. En la actualidad se están empleando tuberías de PVC y PEAD con diferentes diámetros y resistencias, lo que facilita su montaje. Son las encargadas de llevar el agua desde la instalación de bombeo hasta la entrada del sistema de riego.
2. Tuberías conductoras, son las encargadas de conducir el agua desde la (TP) hasta la entrada de las parcelas de riego o hasta las estaciones de control y desde estas hacia las parcelas de riego en el caso de los sistemas RLAF, se colocan generalmente soterradas y se construyen generalmente de materiales plásticos, aunque en el caso de los sistemas de riego por aspersión pueden encontrarse de otro material y usualmente conducen el agua hasta los registros de válvulas.
3. Tuberías distribuidoras, se conciben para distribuir el agua desde los registros de válvulas, ubicados generalmente a la entrada de la parcela de riego y a todo lo ancho de esta y entregarla a las tuberías laterales o mangueras de riego, en el caso de RLAF. En los sistemas de riego localizado se utilizan de material plástico (PABD) y pueden estar colocadas sobre la superficie o por debajo de esta. En el caso de la aspersión convencional la tendencia es ir también al material plástico en un corto plazo, en el caso de los Enrolladores, las mismas se ubican generalmente por debajo de la superficie, pueden ser plásticas o no y son las encargadas de proveer agua a presión a los hidrantes donde se conecta el carrete. En el caso de los pivotes, esta tubería son las que conducen el agua hasta la entrada del Pivot, el material puede ser preferiblemente plástico.
4. Tubería lateral, es la línea porta emisores o porta aspersores y está constituida por elementos rígidos y ligeros como el Aluminio (en el caso de los Pivotes) y material plástico y flexible (PEBD) principalmente en el resto de las técnicas de riego. Todas las tuberías y accesorios se deben caracterizar por su sencillez, ligereza, facilidad de colocación y manejo y resistencia a los golpes y a la corrosión.
5. Aspersores y Emisores: Corresponden a los dispositivos que tienen por finalidad la aplicación directa de agua al terreno.

I.3.- Características de los sistemas de riego presurizados.

Características de los equipos de riego por aspersión convencional, (Martín-Benito, 2005). Este método implica una lluvia más o menos intensa y uniforme sobre la parcela con el objetivo de que el agua se infiltre en el mismo punto donde cae, en esta variante de riego se utilizan dispositivos de emisión o descarga en los que la presión disponible en la tubería porta emisores induce un caudal de salida. La aplicación de agua de un aspersor consiste en un chorro a gran velocidad que se difunde en el aire en un conjunto de gotas, distribuyéndose sobre el terreno, con la pretensión de conseguir un reparto uniforme entre todos los aspersores.

Como efectos derivados de la aplicación del agua de los aspersores se tiene:

- La relación entre la velocidad de aplicación (pluviosidad del sistema) y la capacidad de infiltración del agua en el suelo, produciéndose escorrentía si la primera es mayor que la segunda.
- El posible deterioro de la superficie del terreno por el impacto de las gotas si éstas son muy grandes, y su repercusión en la infiltración, la formación de costra y la erosión.
- La uniformidad de distribución en la superficie y su gran dependencia de la intensidad y dirección del viento.
- La redistribución dentro del suelo por diferencia de potencial hidráulico a distancia de 1 a 3 m, que mejora sensiblemente la uniformidad real del agua en el suelo.

Entre los usos especiales del riego por aspersión convencional se tiene:

- El riego por aspersión puede utilizarse para el reparto de agroquímicos inyectados en el agua (fertilizantes, herbicidas, insecticidas), los sistemas más adaptables a estos usos especiales son las máquinas de riego y los sistemas de aspersión convencional fijos.
- Otros usos especiales del riego por aspersión son: la protección anti helada, el retraso de la floración, el control de microclimas o el reparto de aguas residuales.

En los sistemas móviles, todos los elementos de la instalación son móviles y se instalan sobre la superficie del terreno, incluso puede serlo el grupo de bombeo. Los ramales de riego suelen ser de aluminio o de PVC y se instalan sobre la superficie del terreno. Cuando acaba el riego en una posición, los ramales con los aspersores se trasladan a la siguiente posición, requiriendo por ello una gran cantidad de mano de obra para el riego.

Los sistemas semifijos suelen tener fijo el equipo de bombeo, la red de tuberías principales conductoras y distribuidoras que normalmente va enterrada, y las tomas o hidrantes, donde se conectan las tuberías laterales, que son móviles. Estos ramales de riego pueden llevar directamente acoplados los aspersores o bien ir dotados de mangueras, que desplazan los aspersores a una determinada distancia del lateral (30 a 40 m), pudiéndose realizar varias posturas de riego sin necesidad de cambiar las tuberías. Existe otra variante en la que todas las tuberías son fijas, desplazándose únicamente los tubos porta aspersores y los aspersores.

Los sistemas fijos permanentes mantienen todos sus elementos fijos durante la vida útil, lo que implica que todas las tuberías tengan que estar enterradas, mientras que los sistemas de fijos temporales hay que montarlos al principio de la campaña de riego y retirarlos al final de la misma, lo que implica que los ramales y sus tuberías de alimentación tengan que estar en la superficie.



Figura 1: Sistema de riego por aspersión convencional.

<https://sp.depositphotos.com/116918052/stock-photo-irrigation-system-in-function.html>
(18/072016).

Características de los equipos de riego de Pivote Central, (Martín-Benito, 2005).

Es un ramal de riego con un extremo fijo, por el que recibe el agua y la energía eléctrica, y otro móvil que describe un círculo girando sobre el primero, caracterizándose porque se mueve mientras aplica el agua al cultivo. Está formado por una tubería porta emisores que

va sustentada sobre torres automotrices, dotadas normalmente por un motor eléctrico y dos ruedas neumáticas. Cada tramo va unido a una torre soporte articulado con el tramo anterior, debiendo permitir giros según un eje vertical y otro horizontal. La unión debe ser estanca y sólida, ya que tiene que transmitir esfuerzos importantes.

La propulsión es normalmente con motores eléctricos, por tener ventajas sobre los otros sistemas al permitir una fácil regulación de la velocidad y el sentido de avance, así como poder moverse sin necesidad de regar. Suelen ser de diámetro único y adecuado al caudal a transportar, el cual depende de las necesidades del cultivo y de la superficie a regar. La conexión debe ser sólida y resistente a la corrosión en sus diversas formas ya que el agua llevará disueltos abonos y productos fitosanitarios. El sistema eléctrico está formado por: el tablero de control, funciones de mando y el colector de anillos rasantes, localizados en el pivote central, los cuales se comunican con los cables conductores de las armaduras y las cajas de alineación de las torres de transmisión. Para transmitir corriente a los motores reductores y transmitir las señales a los mecanismos (sistemas de paro automático, opción de cañón final y auto reversa). El tablero central controla la velocidad de desplazamiento y el sentido de avance, el arranque/realignación. El interruptor manual elimina momentáneamente el sistema de seguridad y sirve para realinear la máquina, el conmutador sectorial permite regar un sector circular y el funcionamiento coordinado bomba y pivote de forma automática. Para mantener recto el lateral se dispone de un "mecanismo de alineamiento" que arranca o para, el avance de cada torre conductora mediante un contacto eléctrico, cuando los dos tramos que concurren en la torre forman un ángulo de 20° .

Variación del caudal emitido y la pluviosidad a lo largo del lateral: La pluviosidad crece desde el centro hasta el extremo ya que cada metro del lateral tiene que regar mayor superficie en el mismo tiempo. Así, en un lateral de 402 m, como el que se muestra en la Figura 2, los primeros 201 m riegan el 25 % del área mientras que los 54 m finales riegan otro 25% debiendo por tanto repartir el mismo caudal ambos tramos al regar la misma superficie al mismo tiempo. También puede explicarse el crecimiento progresivo de la pluviosidad desde el centro al extremo del lateral porque el tiempo de la aplicación de agua a un punto del terreno va siendo cada vez menor a medida que se aleja del punto del pivote, y todos los puntos tienen que recibir la misma cantidad de agua.

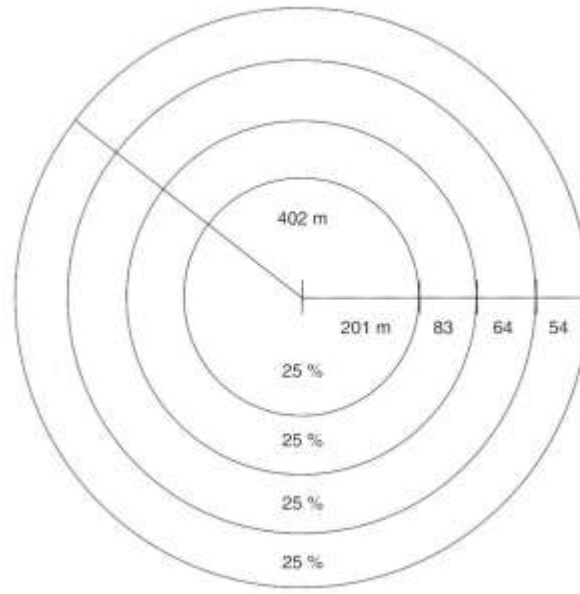


Figura 2: Distribución del agua regada en un lateral de 402m al dividirla en 4 partes iguales, Tarjuelo (2005).

La tubería porta emisores es generalmente de Acero Galvanizado (AoGo) y gira a una altura de entre 3 a 5 metros en dependencia de la altura del cultivo que se pretende beneficiar, también se fabrica de Aluminio y acero con pintura epoxi, los espesores varían entre 2.5 y 4 mm en dependencia del diámetro, siendo los más frecuentes 2.8 y 3.2 mm. La separación entre torres (tramos) varía entre 25 y 75 m, pero las separaciones más frecuentes son de 38 m (los de tramo corto) y 50 m (los de tramo largo), la separación entre los dispositivos de emisión del caudal insertados en la tubería lateral oscila entre 0.75 y 3 m. Los emisores pueden ser aspersores de brazo oscilante, aspersores propiamente o difusores (tipo Spray, Rotator, I - Wob) y se pueden incluir cañones en el extremo.

Existen tres modelos de aplicación de agua de riego que se diferencian entre sí por el tipo de dispositivo de emisión, su disposición a lo largo de la tubería lateral y la anchura mojada que proporciona el aspersor/emisor:

1. Sistemas con aspersores de tamaño creciente desde el centro del pivote hasta el extremo, y que funcionan a alta presión (> 300 kPa) y proporcionan una Anchura Mojada (> 30 m).
2. Sistemas con aspersores de tamaño medio, pero en los cuales la separación entre los dispositivos de emisión disminuye hacia el extremo del pivote, los mismos trabajan con presiones media (entre 200 y 300 kPa). Con una anchura mojada a lo largo de la tubería

lateral que oscila entre 20 y 30 m, excepto cuando se utilizan Rotator los cuales provocan una anchura mojada entre 15 y 20 m.

3. Sistemas con difusores Spray los cuales trabajan a baja presión (entre 70 y 170 kPa) y necesitan reguladores de presión. La separación entre emisores también disminuye hacia el extremo y la anchura mojada oscila entre 6 y 12 m en toda la tubería lateral.

La disposición de emisores más ventajosa para equilibrar las pérdidas por evaporación y escurrimiento con la uniformidad de riego, parece ser la de situar los emisores a 2m sobre la superficie del suelo (NO CON ASPERSORES DE IMPACTO), y con una anchura mojada de 12 a 15 m; esto requiere una presión de trabajo entre 148 y 197 kPa. En estas condiciones pueden utilizarse una separación entre emisores entre 2.5 y 3 m y nunca mayor de los 5 a 7 m en emisores de mayor alcance como los Rotator.

La tendencia actual es ir hacia la baja presión para incrementar el ahorro energético, pero esto tiene como limitantes: mayor pluviosidad en el extremo del pivote debido a que disminuye la anchura mojada y peor adaptabilidad a relieves inclinados ya que a mayor desnivel en la tubería lateral mayor será la variación de presión entre el inicio y el extremo del pivote. Para incrementar la anchura mojada ha surgido una adaptación tecnológica (BOOMS) que se coloca en el extremo del equipo, los cuales pueden disponer de entre 2 y 5 emisores y que en la actualidad es preferida como sustituta de los cañones en el extremo, ya que estos presentan el inconveniente de exigir mayor energía en la Instalación de Bombeo y porque son más sensibles a la dirección e intensidad de los vientos fuertes que afectan la eficiencia de aplicación y la uniformidad del riego.

Los pivotes de tramo largo son generalmente más económicos por disponer de menor número de torres, pero al mismo tiempo son más difíciles de adaptarse a topografías onduladas y tiene mayores posibilidades de atascarse, debido a que transmiten mayor peso al suelo. Las longitudes de los pivots (radio del pivote) oscilan entre 60 y 800 m y la inversión por hectárea regada disminuye al aumentar el mismo. Sin embargo, el costo de la aplicación del agua (mantenimiento, mano de obra, energía y agua consumida) permanece prácticamente constante a partir de 400 a 450 m (50 a 60 Ha), debido a que aumenta considerablemente el costo de la energía. La velocidad de avance del equipo es a saltos, excepto cuando funciona al 100 % de su velocidad y no se detiene, en estos casos puede

alcanzar velocidades entre 1.8 a 3.5 m/min, dependiendo del diámetro de la rueda, llegando hasta 4.5 m/min de velocidad cuando se trata de laterales muy largos.

Tabla 2: Diámetros nominales (exteriores), Tarjuelo (2005).

Diámetro (mm)	Especificaciones
114.3	Se suelen utilizar para longitudes menores de 300m.
141.3	Se suelen utilizar para longitudes entre 300 y 500 m.
152.4	
168.3	Se suelen utilizar para longitudes entre 500 y 600 m, distribuidas equidistantemente.
203.2	
219.1	Se suelen utilizar para longitudes mayores de 600 m, distribuidas equidistantemente.
254	

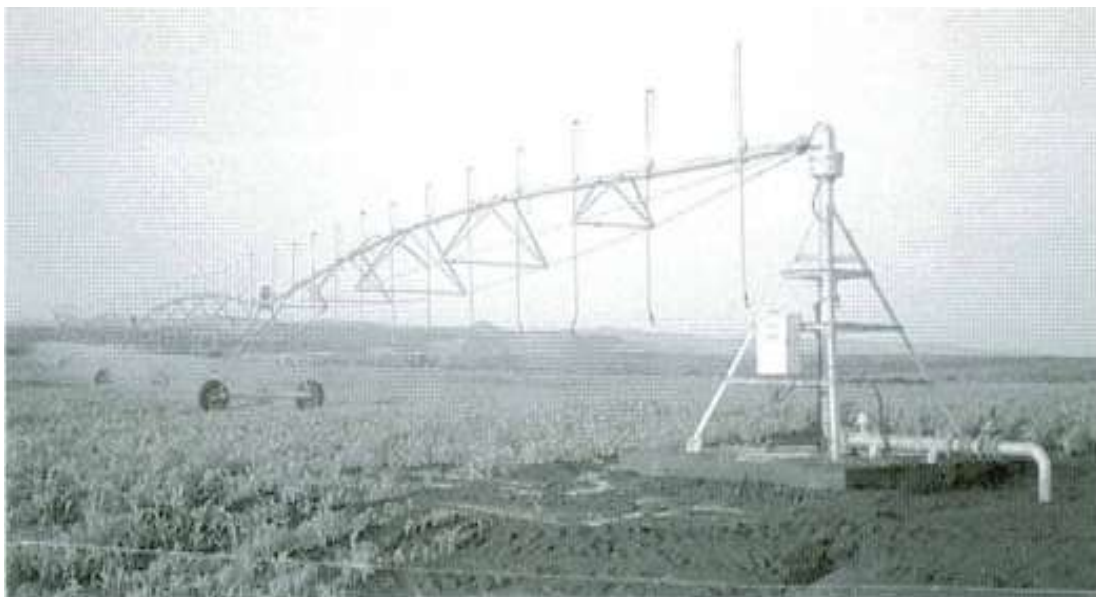


Figura 3: Sistema de riego por Pivote Central. Tarjuelo (2005).

Características del equipo de riego de avance frontal, (Martín-Benito, 2005).

Se trata de una tubería con aspersores o toberas (lateral de riego), formadas por tramos semejantes a los de un pivote, sustentadas por torres automotrices, que desplaza paralela así misma mientras riega. Puede estar formada por dos laterales, uno a cada lado de la línea de suministro de agua, o por un solo lado. La longitud de cada uno de los laterales suele variar entre 200 y 500 m, aunque en caso de un solo lateral este puede llegar hasta 600 m.

Su utilización no es habitual se ve limitada a superficies agrícolas regulares con fuentes de abasto que pueden ser preferiblemente canales rectos revestidos separados equidistantemente de los extremos de las parcelas que se pretende irrigar. No constituyen de los sistemas de riego por aspersion priorizados por la dirección del país para su introducción en los planes de desarrollo agrícola cubano. Por estas razones y por limitaciones de tiempo, los contenidos correspondientes a esta técnica de riego no son incluidos de forma presencial en el programa analítico de la asignatura Ingeniería de Riego.



Figura 4: Sistema de riego por Avance frontal

<https://sp.depositphotos.com/75649577/stock-photo-irrigation-system-on-the-field.html>
(17/07/2015).

Características del equipo de riego con Enrollador, (Martín-Benito, 2005).

Al igual que los anteriores equipos mecanizados de aspersión, los Enrolladores son sistemas de riego de desplazamiento continuo durante la aplicación del agua de riego. Es un aspersor de gran tamaño o cañón, colocado sobre un carro o patín con ruedas, que es arrastrado por la propia manguera flexible de polietileno por la que recibe el agua a presión. La manguera se enrolla en un tambor que es accionado por la propia corriente de agua a través de un mecanismo de turbina o de fuelle hidráulico.

Los enrolladores riegan normalmente un sector circular y son muy adecuados para climas húmedos y subhúmedos, pueden regar bandas de hasta 130 m de ancho. Su principal inconveniente es la presión de trabajo, por ello, la tendencia mundial es reducir la misma y las soluciones están orientas hacia la Alas de Riego (Alas PIVANAS).

Aunque los cañones de riego pueden moverse propulsados por un motor de explosión o por la toma de fuerza de un tractor, lo más frecuente es que lleve un motor hidráulico accionado por la propia corriente del agua, existiendo dos variantes: de pistón o fuelle y de turbina.

En el mecanismo de fuelle hidráulico, él fuelle se expande por la acción del agua en su interior y se contrae por la acción de un melle en su exterior que lo comprime al conectar la cámara interna con la atmosfera. Éste consume una pequeña parte del agua de riego, pero no introduce ninguna pérdida de carga adicional o disminución de presión en el flujo principal, pudiéndose estimar el consumo mediante la Tabla 3.

Tabla 3:Consumo del fuelle en función a la dosis bruta aplicada. Tarjuelo (2005).

Dosis bruta (mm)	Caudal del fuelle/ caudal del enrollador
20	4 a 5 %
30	3 a 4 %
40	2 a 3 %

La velocidad de giro de tambor, y por tanto la de desplazamiento del cañón de riego, se regula sobre el tiempo de vaciado del fuelle por medio de la válvula de escape. Los mecanismos de turbina son los más frecuentes en los Enrolladores, éstos no consumen

agua, pero producen pérdidas de carga en el flujo principal de entre 40 a 100 KPa y en algunas ocasiones más.

Los enrolladores utilizan aspersores rotativos de gran tamaño, los cuales aplican caudales entre 5.5 y 47.2 L/s y humedecen bandas de más de 100 por 500 m de largo (≈ 5 Ha/posición), la pluviometría varía entre 5 y 35 mm/h. Se ha demostrado que se puede conseguir una buena uniformidad de aplicación y un tamaño medio de gota apropiado si se eligen bien, la presión de trabajo, el diámetro de la boquilla, el espaciamiento entre posiciones de riego y el ángulo de descarga del aspersor. Son muy adecuados para explotaciones de parcelas pequeñas dispersas y de tamaño irregular. Los cultivos más apropiados son el pasto y en general cultivos extensivos y no son convenientes en suelos de textura fina y con baja velocidad de infiltración. Muchos de los inconvenientes de los enrolladores son compensados por su bajo costo por hectárea regada y por su poca necesidad de mano de obra.

Las mangueras suelen ser de diámetro entre 50 y 125 mm, con longitudes entre 120 y 500 m, son diseñados para soportar altas presiones y tienen una vida útil de 6 a 8 años. Las mangueras suelen ser de PEMD, para que tengan suficiente resistencia y no sean demasiado rígidas. Estos equipos necesitan normalmente, de un compensador para vaciar la manguera cuando haya que guardar la máquina, cubren normalmente sectores de 200 a 220°, el ángulo de descarga más favorable depende de la dirección e intensidad de los vientos predominantes. La tabla que le sigue muestra los valores recomendables.

Tabla 4: Valores recomendables del ángulo de descarga, Tarjuelo (2005).

Velocidad del viento (m/s)	Ángulo de descarga
≤ 4	21° a 23°
> 4	20° a 21°
El ángulo de sector regado más recomendable oscila entre 200° y 220°	

Las recomendaciones establecen orientar el desplazamiento del cañón perpendicular a la dirección de los vientos predominantes para disminuir los efectos de la intensidad de los

vientos. En el caso de parcelas con pendientes muy pronunciadas conviene que se desplace a favor de la pendiente para que la escorrentía encuentre terreno seco.



Figura 5: Sistema de riego por Enrollador. <https://sp.depositphotos.com/86908924/stock-photo-automated-potato-irrigation.html> (14/10/2015).

Características de los sistemas de riego Localizado, (Pizarro, 1996).

La práctica del diseño considera una serie de coeficientes que caracterizan esta prolífera técnica de riego y constituyen las principales diferencias que contrastan el diseño agronómico con los métodos convencionales o tradicionales de riego. De acuerdo con (Pizarro, 1996) se tiene que:

1. La evaporación directa desde el suelo en los sistemas RLAF es menor que en los riegos convencionales en cambio la transpiración aumenta ligeramente, esto es una consecuencia del efecto de localización.
2. Los sistemas RLAF pueden aumentar espectacularmente las producciones en suelos arenosos o poco profundos con relación a los métodos convencionales de riego, debido a que es posible mantener un régimen de humedad adecuado en el suelo sin elevar excesivamente el costo de las operaciones, sin más limitación práctica que cuando se da más de un riego diario es conveniente la automatización del inicio y final del riego.

3. En los RLAF el suelo solo se satura en un volumen muy reducido próximo al emisor esto puede aliviar los problemas de falta de aireación y de la destrucción superficial de la estructura del suelo con la consiguiente formación de costra que se producen en los suelos muy pesados cuando se aplican técnicas de riego convencionales, además, la alta frecuencia con que se operan estos sistemas provoca que se mantenga baja la salinidad, manteniendo en niveles adecuados la capacidad de absorción de las raíces.

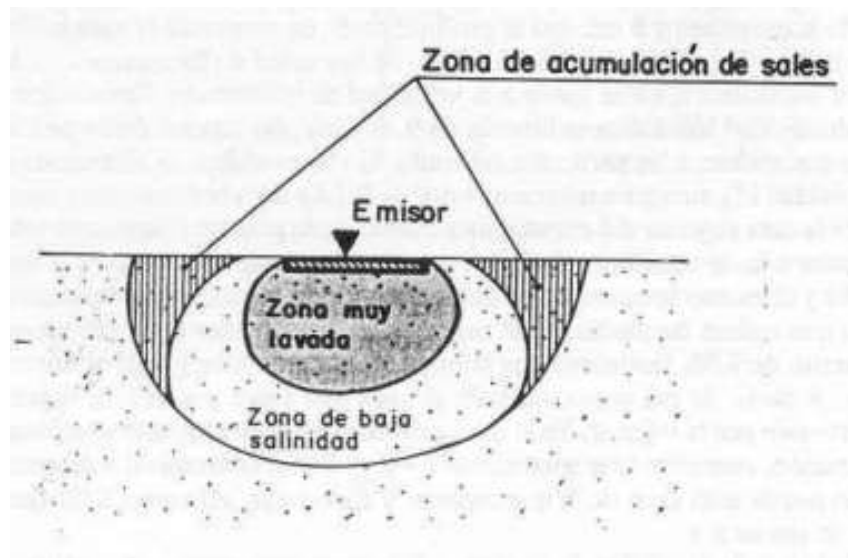


Figura 6:Efecto de la localización y la alta frecuencia en el suelo. Pizarro (2000).

4. Otra característica muy especial de los RLAF es la Fertirrigación, la cual si bien no es una exclusiva de esta técnica de riego si constituye una necesidad, dado que al solo explorar las raíces una parte del suelo, los nutrientes situados fuera de su alcance no son muy efectivos, además, la gran actividad del bulbo húmedo podría agotar algunos nutrientes si no se repusieran con frecuencia.
5. El agua se aplica al suelo desde una fuente que puede considerarse puntual, se infiltra en el suelo y se mueve en dirección horizontal y vertical. En esto difiere sustancialmente de los métodos de riego clásicos en los que predomina el movimiento vertical.
6. Las necesidades de agua de los cultivos con RLAF son prácticamente iguales que con otros sistemas de riego. Donde se consiguen importantes ahorros de agua es en la conducción y en la aplicación en parcela, al disminuir las pérdidas por percolación y escorrentía.
7. Los cultivos se desarrollan satisfactoriamente, aunque las raíces exploren solo una parte del suelo, cuya extensión debe ser como mínimo del 30 – 40 % del área sombreada. La

competencia por la luz y las necesidades de espacios para las labores limitan la intensificación de los marcos de plantación.

8. Los rendimientos de los cultivos no responden a la técnica de riego en sí, más bien, al régimen de humedad en el suelo que estas propician y a las características del manejo del sistema.
9. La gran ventaja de los RLAF se presenta en los suelos marginales, en los cuales es muy difícil y costoso alcanzar un adecuado régimen de humedad con métodos convencionales de riego. Así como los riegos localizados permiten una mejor y más racional fertirrigación, su utilización en el caso de suelos salinos requiere con frecuencia de la utilización de técnicas de riego convencionales para aplicar lavados complementarios.
10. La alta frecuencia en los sistemas RLAF, permite mantener una humedad elevada en la zona radicular, por lo que la absorción de agua por las raíces exige menor trabajo metabólico, permitiendo dedicar esa energía para otras funciones relacionadas con su crecimiento y desarrollo, propiciando el incremento de los rendimientos. Experiencias han demostrado que existe un valor umbral de humedad en el suelo por debajo del cual la producción del cultivo se resiente, este valor se establece en términos de tensión de humedad, a los efectos del diseño lo que interesa son los componentes que tienden a retener la humedad (potencial mátrico y osmótico).

La figura 11 muestra una de las ventajas que caracteriza los sistemas de riego por goteo y sugiere el valor de (IR) a asumir.

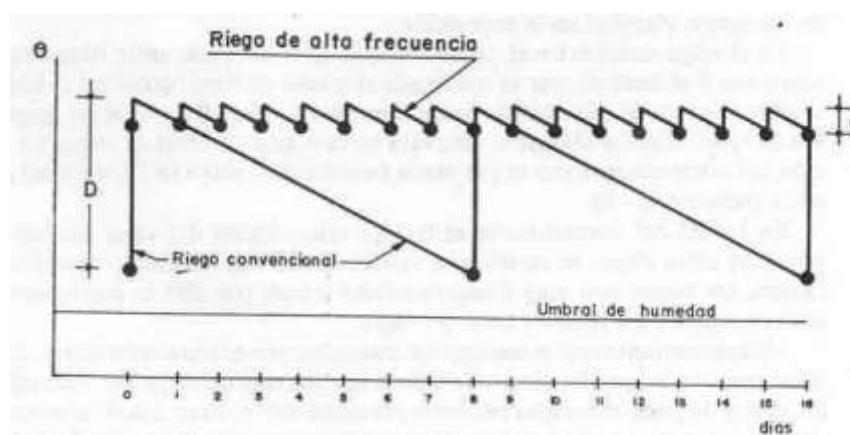


Figura 7: Efecto de la alta frecuencia con riego localizado. Pizarro (1996).



Figura 8:Sistema de riego por goteo . <https://sp.depositphotos.com/47438895/stock-photo-drip-irrigation-system.html> 3/6/2014



Figura 9:Sistema de riego por microaspersión
. <https://sp.depositphotos.com/33436439/stock-photo-close-up-sprinkler.html> 16/10/2013

I.3.1.- Ventajas e Inconvenientes de los sistemas de riego presurizados.

Ventajas e inconvenientes del sistema de riego por aspersión, (Martín-Benito, 2005).

Ventajas:

- La distribución del agua en el terreno es bastante uniforme.
- Puede ser utilizado en suelos con grandes velocidades de infiltración.
- Su empleo es adecuado en terrenos con grandes pendientes.
- Es de alta eficiencia de aplicación, lo cual lo hace adecuado en regiones con limitaciones de agua.
- Se puede operar en horas de la noche.
- Los sistemas pueden ser instalados con mayor rapidez.
- Permite aplicar normas de riego pequeñas y con gran frecuencia.
- Permite la automatización y mecanización del sistema de riego.
- No interfiere las labores de mecanización agrícola (tuberías portátiles o soterradas).
- Se puede aplicar el fertilizante junto con el agua de riego (fertirrigación).

Inconvenientes:

- Altos costos de inversión en equipos, aun cuando en algunas situaciones el riego por aspersión más económico que los que implica la nivelación de suelos para riego superficial.
- Altos costos de operación en aquellos equipos que requieren impulsión mecánica para dar la presión necesaria (costo de energía).
- Su uso se ve limitado en **áreas de excesivo viento**, donde este afecta la uniformidad de distribución y eficiencia en la aplicación del agua.
- No es posible aplicarlo en áreas donde el caudal no es continuo, a menos que se cuente con un tranque acumulador que permita asegurar continuidad de caudal entre dos turnos de entrega de agua.
- Aguas de mala calidad, en particular aguas de alto contenido de sales.
- Requiere de alto consumo de energía comparado con el resto de los métodos de riego.
- Es de alta inversión inicial.

Ventajas e inconvenientes de los sistemas de RLAF, (Pizarro, 1996).

Ventajas:

- Una ventaja innegable de los RLAF sobre los otros métodos de riego tradicionales es que facilita la explotación del sistema ya que no entorpece las labores agrotécnicas del cultivo.
- En los sistemas de RLAF se economiza el tiempo y mano de obra. Bien concebidos, contruidos correctamente y con todos sus componentes trabajando eficientemente puede funcionar muy bien con una fuerza de trabajo reducida, esto es muy conveniente cuando la mano de obra es muy escasa o costosa.
- La lucha contra las malas hiervas y enfermedades que perjudican los cultivos e hacen más fáciles en estos sistemas y es menos costosa que en los sistemas con técnicas de riego convencionales.
- Su utilización ha dado resultados halagadores en los llamados suelos difíciles (muy pesados o muy permeables), además se ha comprobado su alta eficiencia de entrega en terrenos ondulados y con pendientes exageradas.
- Permite aplicar altas frecuencias de riego al tiempo que es posible medir los caudales de entrega en cada tiempo de puesta, esto es conveniente para poder mantener el régimen de humedad deseado en el suelo.
- La alta frecuencia de riego facilita la absorción de agua por el doble efecto de mantener alta la humedad y baja la salinidad.
- En cuanto a la Fertirrigacion en los RLAF, se ha comprobado que es mejor su distribución en el suelo y por tanto la asimilación de nutrientes por parte de las plantas. También es posible adecuar el abono a las necesidades del momento y con la rapidez necesaria lo cual hace más económico la distribución del abono. En conclusión, con los sistemas de RLAF se puede ahorrar fertilizantes.

Inconvenientes:

- Uno de los primeros inconvenientes que planteo este método de riego, es que requiere de un sistema de filtrado eficiente para evitar las obstrucciones de los emisores, lo cual en determinados casos puede resultar costoso.
- Existe un incremento en el costo de la inversión inicial en comparación con los sistemas de riego.

- Al igual que el fertirriego es inseparable de los RLAF, el régimen de sales obliga a un manejo especial de riegos y lavados.
- Otro aspecto que puede resultar inconveniente es el limitado desarrollo radicular, en el Riego Localizado la mayoría de las raíces se concentran en la zona humedad y si esta es demasiado pequeña el enraizamiento puede ser insuficiente lo cual puede afectar los rendimientos y el anclaje de los cultivos, de todas formas, este es un aspecto que se tiene en cuenta en el Diseño Agronómico.
- Otro inconveniente en estos casos es el hecho de que la planta se hace más dependiente del riego y sufre más la falta del agua por cualquier rotura u otro imprevisto que un riego convencional, esto también es tenido en cuenta al decidir sobre la frecuencia y el tiempo de puesta en posición.

I.4.- Particularidades del diseño de los sistemas de riego presurizados.

Aspersión convencional:

De acuerdo con (Martín-Benito, 2005), de acuerdo a la presión de operación, los aspersores se pueden clasificar en:

1. Aspersores de baja presión: funcionan con una presión entre 100 y 250 kPa, suelen ser de una sola boquilla con diámetro menor de 4 mm, con giro por choque y descargas menores de 0.3 L/s. Son adecuados para trabajar en disposiciones rectangulares y cuadradas, con separación entre aspersores de 12 m, o triangulares con separación entre aspersores de 15 m. Suelen utilizarse en jardinería y para el riego de hortalizas y vegetales, también son adecuados para el riego de frutales con un ángulo de salida preferiblemente bajo para propiciar el humedecimiento por debajo de la copa del árbol. En la actualidad se están fabricando aspersores con boquillas especiales de tipo orificio que trabajan con presiones de hasta 200 kPa y tienen una uniformidad de aplicación adecuada con las mismas disposiciones y aún en presencia de vientos mayores de 4 m/s.
2. Aspersores de presión intermedia: funcionan con una presión entre 250 y 400 kPa, suelen poder disponer de una o dos boquillas con diámetros entre 4 y 7 mm y descargas entre 0.3 y 1.7 L/s. Son adecuados para trabajar en disposiciones cuadradas, con separación entre aspersores de 12 y 24 m.

3. Aspersores de alta presión: funcionan con una presión mayor de 400 kPa, suelen ser aspersores de gran tamaño llamados también cañones de riego y tener una, dos y hasta tres boquillas, descargan caudales entre 1.7 y 12 L/s e incluso llegar hasta los 56 L/s en el caso de los cañones de riego. El mecanismo de giro suele ser de choque o de turbina, pueden alcanzar radios de entre 25 y 70 m, tienen una baja uniformidad de distribución ya que son muy susceptibles a la intensidad y dirección de los vientos predominantes, así mismo el gran tamaño de gota que producen y la altura de la caída puede dañar al suelo o al cultivo.

Como factores prácticos a tener en cuenta en el funcionamiento entre aspersores pueden destacarse:

1. El caudal emitido por el aspersor, es función del tamaño de las boquillas y de la presión existente en las mismas. Viene dado por la curva característica del aspersor: $Q = K \times H^x$, donde el caudal se expresa en L/h, la presión en mca, el exponente de descarga ≈ 0.5 y el coeficiente K depende del diámetro y la forma del orificio.
2. La disposición de los aspersores, es la que determina el porcentaje de solapamiento de la humedad que logran los aspersores para garantizar la uniformidad de aplicación del riego. Los más utilizados suelen ser (12 × 12), (12 × 15), (12 × 18), (15 × 15) y (18 × 18), en general son múltiplos de 6 ó 9 m para sistemas de riego con los laterales en la superficie y pueden tomar cualquier valor cuando los laterales están soterrados. En estas disposiciones la superficie irrigada por cada aspersor se representa sombreada en las figuras que le siguen:

- Disposición rectangular: $S = l \times l'$
- Disposición cuadrada: $S = l \times l$
- Disposición triangular: $S = \frac{l^2 \times \sqrt{3}}{2}$

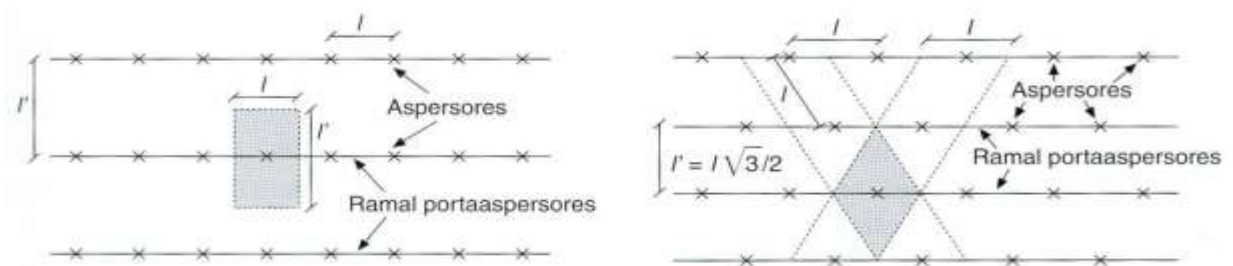


Figura 10:Marco o disposición conjunta de los aspersores. Fuente: (Tarjuelo 2005).

La separación entre aspersores es un parámetro fundamental en el diseño de estos sistemas de riego. Heerman y Kohl (1980) recomiendan separaciones del 60 % del diámetro efectivo del aspersor para disposiciones cuadradas y triangulares y entre el 40 y el 75 % para disposiciones rectangulares, siempre que se trate de vientos menores de 2 m/s. Esta separación debe disminuirse al aumentar la velocidad del viento, la tabla que le sigue sugiere algunos valores. Se entiende por diámetro efectivo el 95 % del diámetro mojado por aspersores con dos boquillas y el 90 % de este para aspersores de una boquilla.

Tabla 5: Porcentaje de reducción de la separación entre aspersores en función de la velocidad del viento, Tarjuelo (2005).

% de reducción	Velocidad del viento(m/s)
10-12	4-6
18-20	8-9
25-30	10-11

3. Pluviosidad media, representa la pluviosidad que se obtendría si se distribuyera uniformemente el caudal emitido por el aspersor en la superficie que teóricamente riega, de acuerdo con la disposición adoptada. Este parámetro es el cociente del caudal descargado por el aspersor (L/h) entre la superficie correspondiente a la disposición adoptada (m^2), es el parámetro que mejor define la intensidad de la lluvia que aplica el aspersor.
4. Distribución del caudal sobre el suelo, las rociadas emitidas por cada aspersor deben distribuirse de forma que el impacto de las gotas y la intensidad de la lluvia no perjudiquen las condiciones físicas del cultivo o del suelo, logrando la máxima uniformidad posible. La fricción con el aire de la vena líquida constituye la principal causa de que el agua llegue pulverizada al suelo, aunque también influye el choque con el brazo oscilante y la acción del rompe chorro que puede colocarse opcionalmente. El tipo de chorro emitido depende principalmente del diseño geométrico del aspersor y las boquillas, de su presión de trabajo y de las condiciones del viento. Al aumentar la presión disminuye el tamaño de la gota y un exceso de esta produce una pulverización excesiva del chorro y una brusca disminución de la uniformidad de aplicación cuando hay vientos fuertes.

Pivote Central eléctrico Cuando el viento sopla hacia el centro del Pivote en la dirección de la tubería lateral, el área regada disminuye aproximadamente un 17 %, cuando sopla hacia el extremo el área regada crece aproximadamente el 19 %. Como la velocidad del viento crece con la altura la tendencia en estos equipos de riego es utilizar aspersores de ángulo bajo entre 7° y 10° o en su lugar boquillas difusoras de baja presión con alargaderas que colocan los emisores muy cerca de la superficie del suelo y son muy convenientes para irrigar cultivos delicados como las hortalizas y algunos vegetales sin los inconvenientes que provoca la incidencia del viento.

En la actualidad se avanza en la introducción de estos equipos para el riego de cultivos cítricos y frutales sembrados de forma circular y utilizando emisores de riego localizado. Existen limitaciones de carácter agronómico que están relacionadas con el tipo de cultivo, la capacidad de almacenamiento del suelo, la velocidad de infiltración, la pendiente y el almacenaje superficial entre otras.

La pendiente radial a vencer por el Pivote debe ser menor de 10 al 15 % para diámetros del tubo mayores o iguales a 254 mm y se admite hasta el 30% para diámetros del tubo menores o iguales a 152.4 mm. La pendiente tangencial se acepta hasta el 20 % para surcos pequeños (ancho de fondo < 0.15 m) y hasta 15 % cuando se trata de surcos mayores (ancho de fondo ≥ 0.15 m).

Los modelos de torres cortas se adaptan mejor a las topografías irregulares que los modelos de torres largas. Los modelos que utilizan dispositivos de emisión de baja presión son más sensibles a las variaciones de presión, además de presentar mayor pluviosidad en el extremo.

La baja velocidad de infiltración, así como la menor capacidad de almacenamiento del suelo principalmente en la superficie constituyen limitantes importantes a considerar en el diseño. Los residuos de las cosechas aumentan la velocidad de infiltración del suelo. El almacenaje superficial varía durante la temporada de riegos.

Tabla 6: Valores de Almacenaje superficial según la pendiente del suelo, SHOCKLEY citado por Tarjuelo (2005).

Pendiente (%)	Almacenaje superficial (mm)
0 – 1	12.7
1 – 3	7.6
3 – 5	2.5

La siguiente tabla orienta sobre las dosis de riego admisibles para diferentes texturas del suelo, tipo de pivotes y anchura superficial

Tabla 7: Valores orientativos de dosis máximas de riego según el tipo de suelo, Tarjuelo (2005).

Familia de infiltración	Tipo de sistema	Almacenaje superficial (mm)			
		0	2.5	7.6	12.7
0.3 (Arcilloso)	A	20	30	43	56
	B	13	20	33	41
	C	5	13	23	30
	D	<3	8	18	25
	E	<3	<3	13	20
0.5 (Franco)	A	51	66	84	-
	B	25	36	51	64
	C	10	18	30	41
	D	<3	13	20	33
	E	<3	8	18	23
0.1 (Arenoso)	A	SL	SL	SL	SL
	B	107	122	SL	SL
	C	36	48	66	81
	D	18	28	43	56
	E	10	20	20	48

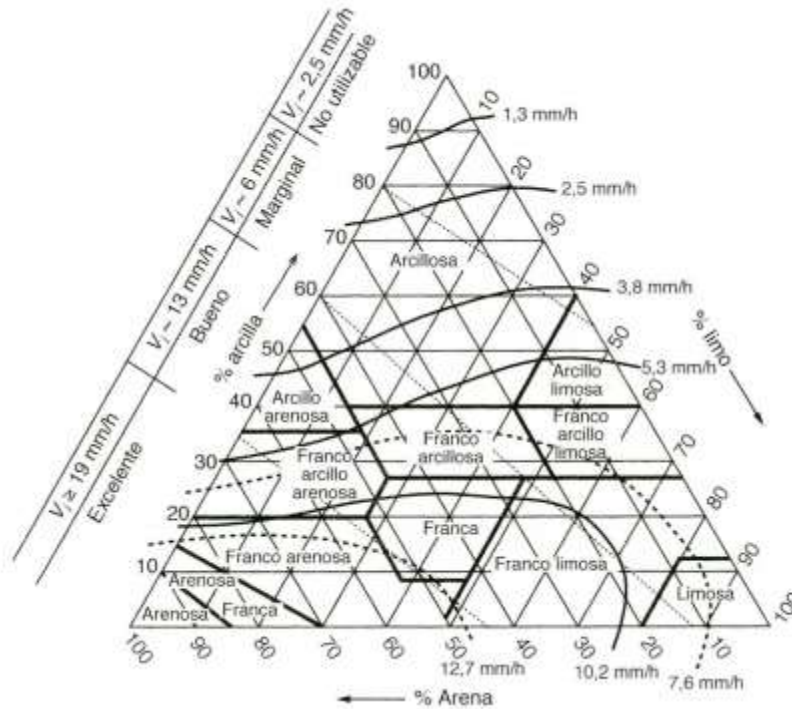
A: Típico sistema de alta presión con pluviosidad máxima de 25 mm/h.

B: Típico sistema de media presión con pluviosidad máxima de 38 mm/h.

C: Típico sistema de aspersores de baja presión con pluviosidad máxima de 64 mm/h

D: Típico sistema de toberas de baja presión con descarga en 360° y una pluviosidad máxima de 89 mm/h.

La Figura 9 permite estimar la velocidad de infiltración en función de la textura del suelo.



Las pérdidas de carga se estiman por la fórmula universal (Darcy – Weisbach) o por algunas de sus simplificaciones que desprecian el factor cinético (Scobey; Hazen – Williams) y se debe tener en cuenta si existe o no un aspersor en el extremo de la tubería, la presencia de un Cañón en el extremo del pivote ofrece más inconvenientes que ventajas:

1. Bajo costo por hectárea regada.
2. Aumentan las pérdidas de carga y los costos energéticos.

3. Aumenta la presión de trabajo en los dispositivos de emisión.
4. Disminuye la uniformidad de reparto de agua.

Los supuestos de partida de Chu y Moe (1972), ampliados por Scaloppi y Allen (1993) son:

1. La descarga es continua a lo largo de la tubería (infinito número de salidas).
2. Se cumplen la Leyes de Conservación de la Masa y de la Energía.
3. La tubería lateral es prismática.
4. El caudal es cero en el extremo del pivote sin cañón e igual a la descarga del cañón cuando lleva cañón al final.
5. Las pérdidas en los accesorios y singularidades se incluyen en el coeficiente de fricción. También pueden considerarse e/t 10 al 20% de las pérdidas continuas.
6. El cálculo del coeficiente de fricción es insensible al número de salidas cuando este es superior de 10 a 20 salidas.
7. El flujo es turbulento y se desprecia el término cinético.
8. Se considera una relación $\frac{L}{R} \cong 0.94$. Cuando no existe cañón $L = R$

Tabla 8: Parámetros para el cálculo hidráulico de los Pivotes. Tarjuelo (2005).

Condición	K _{STC}	Exponente del gasto	Observaciones
Darcy – Weisbach	0.533	m = 2	Con cañón y sin cañón
Hazen – Williams	0.548	m =1.852	Con cañón y sin cañón
270 salidas	0.55	m =1.852	Pérdidas por tramo
40 salidas	0.56	m =1.852	Pérdidas por tramo
AoGo nuevo			C = 128
AoGo usado			C = 115

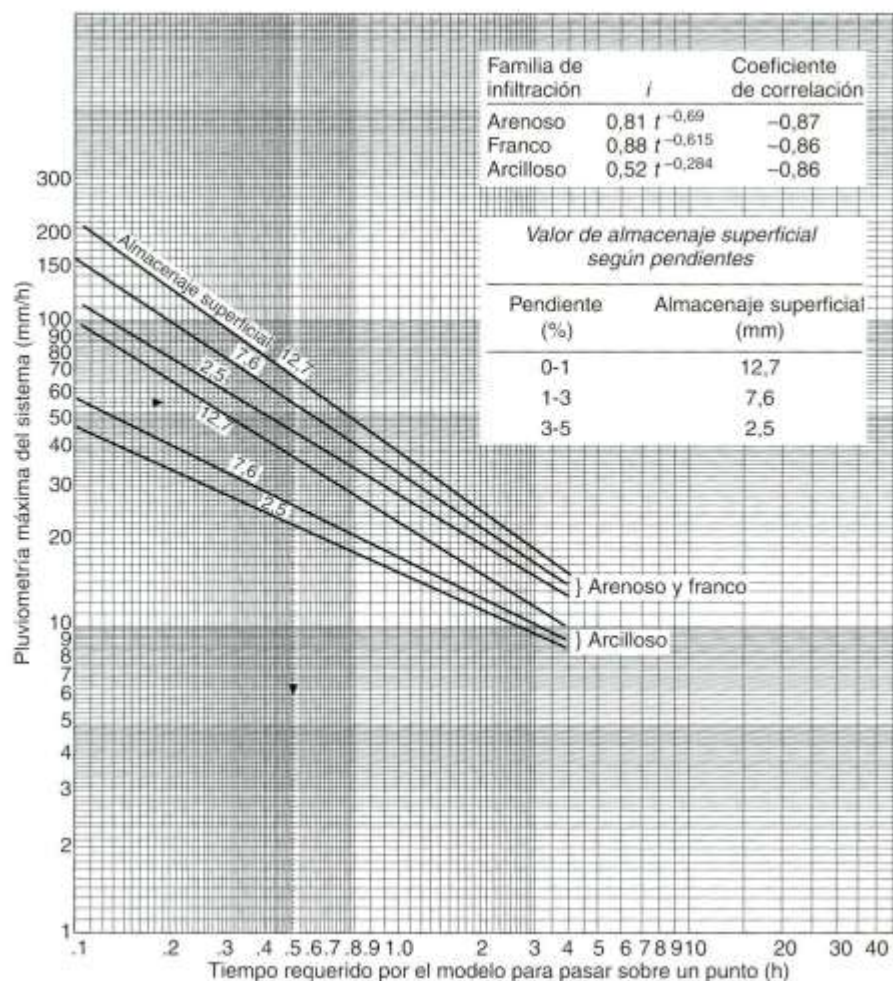


Figura 12: Ábaco para la determinación del tiempo máximo empleado por el equipo en pasar por un punto del extremo para que no haya escorrentía. Fuente: Tarjuelo (2005).

El pivote aplica el agua al cultivo aprovechando las propiedades hidrofísicas del suelo, especialmente la textura, la capacidad de almacenamiento, el almacenaje superficial, la velocidad de infiltración y las pendientes predominantes. Al mismo tiempo el agua es aplicada a los cultivos con el equipo en movimiento, para ello es necesario programar la velocidad de rotación del pivote de manera que la pluviometría del equipo sea suficiente para entregar la dosis establecida durante el diseño agronómico. Para ello es necesario conocer el tiempo máximo que demora el equipo desde que comienza a mojar un punto en el extremo del pivote hasta que deja de hacerlo. El gráfico propuesto por (.R.C, 1972), mostrado en la figura anterior, permite estimar con bastante precisión este parámetro y es muy utilizado en la práctica del diseño para sistemas de alta presión y aspersores que tengan un modelo de distribución elíptico.

Enrollador: También corresponde a un sistema de aspersión de desplazamiento continuo, es decir, se aplica agua en movimiento, por medio de un aspersor de gran tamaño (cañón de riego) colocado sobre un carro con ruedas, el cual es arrastrado por una manguera flexible que entrega el agua a presión. La manguera se enrolla automáticamente en un tambor (Carrete de riego) accionado por un flujo de agua a través de un mecanismo de turbina o fuelle hidráulico. La presión es generada por una bomba generalmente centrífuga, la cual puede ser accionada por un motor eléctrico o a combustión interna.

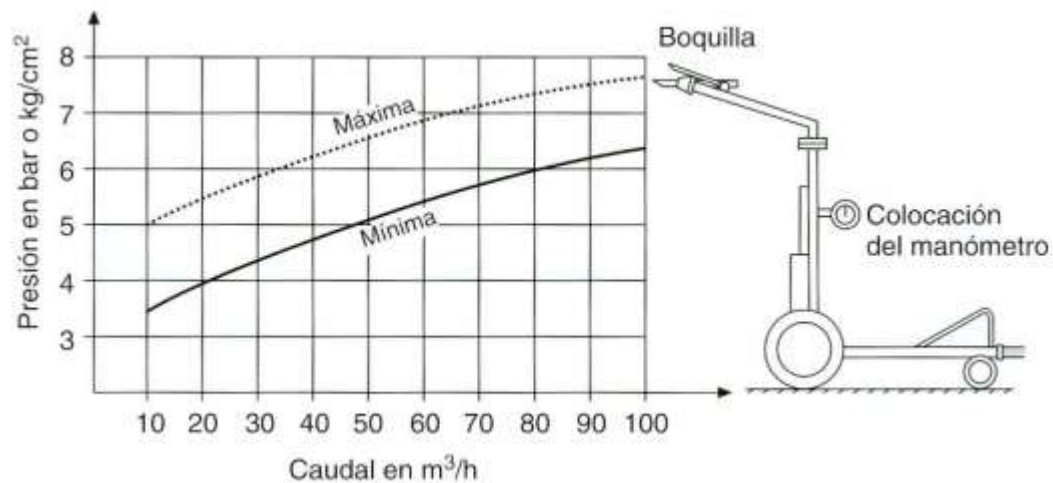


Figura 13: Intervalo de presión recomendado en el cañón según el caudal descargado, CEMAGREF (1990).

La presión de funcionamiento del cañón no deberá variar más del 20 % de su presión nominal en ningún punto de la parcela, para que el caudal descargado no varíe más del 10 % en toda la parcela de riego. La figura anterior aborda las presiones de trabajo recomendadas para obtener un tamaño de gota medio y una adecuada uniformidad de distribución del caudal. Los espaciamientos entre posiciones de riego más apropiadas en función de la intensidad de la velocidad de los vientos, se ofrecen en la tabla que le sigue:

Tabla 9: Valores recomendados del espaciamiento entre bandas regadas en función de la velocidad del viento, Tarjuelo (2005).

	Velocidad del viento (m/s)			
	0-1	1-2.5	2.5-5	>5
Espaciamiento (%de diámetro mojado)	80	75-70	65-60	55-50

Los porcentajes más altos del intervalo de espaciamientos son para boquillas cónicas y los más bajos son para boquillas de anillas. El diámetro mojado que se considera será el correspondiente a la presión mínima en la parcela. El espaciamiento adoptado definitivamente será el que más se aproxime a este al dividir la dimensión correspondiente en la parcela a un número entero de bandas regadas. (R.D, 1990), consideran adecuado situar el cañón al comienzo del riego a una distancia del borde de la parcela = $2/3$ del radio de alcance del aspersor y que además el tiempo que el cañón debe regar sin desplazarse, al inicio de la banda, debe ser aproximadamente igual al tiempo que tardaría el cañón en recorrer la distancia que lo separa del borde.

Se recomienda para el diseño un tiempo de cambio de una posición a otra ≤ 1 h y un tiempo de operación diaria entre 10 y 20 h, lo que conlleva a 1 ó 2 posiciones diarias. Igualmente se recomienda incrementar el caudal del cañón un 20% para prever el riego en presencia de vientos fuertes, así como irrigar cultivos de mayor demanda hídrica y para casos de roturas imprevistos. Para estimar las pérdidas de carga continuas se puede utilizar la aproximación de Scobey:

Tabla 10: Valores del coeficiente de fricción para la fórmula de Scobey Tarjuelo (2005).

Ks	0.42	AoGo con acoples
Ks	0.40	Al con acoples
Ks	0.36	Acero nuevo
Ks	0.32	AoCo; Plástico

La presión de trabajo de los Enrolladores usualmente oscila entre 400 y 1000 kPa, el caudal que descarga puede variar entre 20 y 170 m³/h. La intensidad de aplicación es elevada y varía entre 5 y 35 mm/h. El equipo debe estar separado al menos 30 m de los tendidos eléctricos. El riego se realiza por bandas que pueden tener entre 60 y 120 m un ancho.

Para efectuar el riego se desenrolla la manguera hasta situar el cañón a una distancia del borde de la parcela, la manguera se recoge a una velocidad constante, que depende de la dosis de riego a aplicar. Una vez enrollada la manguera y finalizado el riego de esa banda, se repite la aplicación en la siguiente. El Enrollador es adecuado para climas húmedos y

semihúmedos, ya que el consumo energía es muy alto para usarlos en riegos continuos, por lo que significa en costo de operación.

Sistemas de riego localizado:

Los sistemas de riego por goteo son los más populares dentro de este método de riego, son utilizados normalmente en cultivos con marco de plantación amplio (olivar, frutales, etc.), en Casas de Cultivo (tomate, pimiento, pepino, melón, ornamentales), y en algunas explotaciones de cultivos en línea (algodón, coliflor, repollo, patata, etc.). Los goteros suelen trabajar a una presión de aproximadamente 100 kPa y suministran caudales entre 2 y 16 L/h. Lo más frecuente es que las tuberías laterales y los goteros estén situados sobre la superficie del suelo, y el agua se infiltre y distribuya en el subsuelo, este es el riego por goteo en superficie. En otras ocasiones las tuberías laterales se entierran entre 0.2 y 0.7 m. y los goteros aportan el agua a esa profundidad, conociéndose entonces como riego por goteo subterráneo. La profundidad de enterrado del porta goteros dependerá del tipo de cultivo y del tipo de suelo. Este sistema está basado en la utilización de franjas de humedad que garantizan una buena uniformidad de riego.

En el caso *del riego por tuberías emisoras*: Se caracteriza por la instalación de tuberías emisoras sobre la superficie del suelo creando una banda continua de suelo humedecido y no en puntos localizados como en el riego por goteo. Su uso más frecuente es en cultivos en línea con muy poca distancia entre plantas. Las más utilizadas son las tuberías gateadoras y las tuberías exudantes.

En el caso *del riego por cintas de exudación (tuberías porosas)*: Las cintas de exudación son tuberías de material poroso que distribuyen el agua de forma continua a través de los poros, lo que da lugar a la formación de una franja continua de humedad, que las hace muy indicadas para el riego de cultivos en línea. Humedecen una gran superficie y es especialmente interesante en suelo arenoso. Puede utilizarse en el riego de árboles. Las presiones de trabajo son menores que las de los goteros. Esto hace necesario el empleo de reguladores de presión especiales o micro limitadores de caudal.

En los sistemas de riego por microaspersión, el agua se aplica sobre la superficie del suelo en forma de lluvia muy fina, mojando una zona determinada que depende del alcance de cada emisor. Está indicado tanto para cultivos leñosos como para cultivos herbáceos de distinto marco de plantación. Se distinguen los emisores denominados microaspersores y

los denominados microdifusores. En ambos casos suelen trabajar a presiones entre 100 y 200 kPa y suministran caudales de hasta 200 L/h. Son preferibles en suelos de textura arenosa ya que humedecen más superficie que los propios goteros tradicionales, por ejemplo, para regar frutales, es idóneo para macizos de flores y pequeñas parcelas áreas de riego.

Mediante el Diseño Agronómico de los sistemas de Riego Localizado, se garantiza suministrar con una óptima eficiencia las necesidades hídricas del cultivo durante el período de máxima demanda, evitando al mismo tiempo la salinización del suelo por falta de lavado o la insuficiencia en el volumen de suelo humedecido por instalar un número equivocado de emisores. Este objetivo se logra determinando las Necesidades totales de agua del cultivo, el cálculo se realiza de manera diferente a como se realiza en la aspersión pues además del coeficiente de cultivo de la fase más exigente, se emplean otros coeficientes que tienen en cuenta la localización del riego, la variabilidad climática y la influencia de la advección en el consumo del cultivo, así como la tolerancia del cultivo a la salinidad y la calidad del agua de riego, ya que estos parámetros, pueden hacer incrementar las necesidades netas de riego con alguna fracción de lavado, la cual deberá mayorarse con la eficiencia de aplicación para garantizar que las plantas que menos agua reciben, dispongan de suficiente cantidad para satisfacer estas necesidades.

Para suministrar estas necesidades se establece la combinación de dosis, frecuencia y duración del riego que permita conseguir el volumen de suelo mojado adecuado. En el cálculo de las Necesidades de agua con los RLAF se debe tener en cuenta que:

- 1.** Las necesidades de agua de los cultivos con RLAF son prácticamente iguales que con otros sistemas de riego. Donde se consiguen importantes ahorros de agua es en la conducción y en la aplicación en parcela, al disminuir las pérdidas por percolación y escorrentía.
- 2.** Los cultivos se desarrollan satisfactoriamente, aunque las raíces exploren solo una parte del suelo, cuya extensión debe ser como mínimo del 30 – 40 % del área sombreada. La competencia por la luz y las necesidades de espacios para las labores limitan la intensificación de los marcos de plantación.

3. Los rendimientos de los cultivos no responden a la técnica de riego en sí, más bien, al régimen de humedad en el suelo que estas propician y a las características del manejo del sistema.

4. La gran ventaja de los RLAF se presenta en los suelos marginales, en los cuales es muy difícil y costoso alcanzar un adecuado régimen de humedad con métodos convencionales de riego. Así como los riegos localizados permiten una mejor y más racional fertirrigación, su utilización en el caso de suelos salinos requiere con frecuencia de la utilización de técnicas de riego convencionales para aplicar lavados complementarios.

Los resultados obtenidos en esta etapa, son utilizados en la siguiente fase del diseño, dedicada al diseño hidráulico de la instalación, donde se establece la combinación de diámetros y longitudes de tuberías que permita que el régimen de presiones del sistema, se comporte de manera que se satisfagan los requerimientos del cultivo. De esta forma el procedimiento del diseño queda dividido en dos partes, una dedicada al Diseño Agronómico y la otra al Diseño Hidráulico.

Siendo así, el diseño agronómico proporciona además los datos básicos para el diseño hidráulico, la finalidad del Diseño Hidráulico es conseguir el dimensionamiento adecuado de la instalación para satisfacer las exigencias establecidas en el Diseño Agronómico, además de los datos calculados, en esta fase del diseño también interviene la topografía, la cual conjuntamente con las características del agua y las prácticas de cultivo, influirán en la elección del emisor y la disposición de los laterales. Además del relieve se tendrán en cuenta las preferencias del inversionista, precio, características hidráulicas de los agregados de riego y otros.

El procedimiento de diseño hidráulico no es unidireccional, por el contrario, en muchas de sus fases deberá ser de prueba y error, teniendo que probar varias posibilidades, este es uno de los elementos que justifica el diseño asistido por computadoras.

Teoría hidráulica de los emisores de Riego Localizado:

1. Caudal uniforme y constante. Poco sensibles a las variaciones de presión.
2. Poca sensibilidad a las obturaciones y a los cambios de temperatura.
3. Elevada uniformidad de fabricación. Resistencia a la agresividad química y ambiental, así como a las operaciones agrícolas.
4. Bajo costo.

5. Estabilidad caudal – presión a lo largo del tiempo.
6. Reducida pérdida de carga en el sistema de conexión.

La tabla que le sigue, propuesta por (Pizarro, 1996), muestra la clasificación de los emisores de Riego Localizado, de acuerdo al coeficiente de variación de fabricación.

Tabla 11: Clasificación de los emisores, Pizarro (1996).

Goterros y Microaspersores		Mangueras de goteo	
$C_v \leq 0.05$	Buenos	$C_v \leq 0.05$	Buenos
$0.05 < C_v < 0.10$	Medios	$0.10 < C_v \leq 0.20$	Medios
$0.10 < C_v \leq 0.15$	Deficientes	$C_v > 0.20$	Inaceptables
$C_v > 0.15$	Inaceptables		

Todos los emisores de Riego Localizado, al igual que los aspersores de Riego por Aspersión regulan su flujo por disipación de la energía a través de una resistencia al rozamiento y generalmente operan de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Q = K \times H^x$$

Dónde:

$Q \rightarrow$ Caudal del emisor (L/h).

$H \rightarrow$ Presión de trabajo del emisor (mca).

$x \rightarrow$ Exponente de descarga.

$K \rightarrow$ Coeficiente de descarga.

El valor de K está relacionado con las dimensiones físicas del conducto de agua, el valor de x varía entre 0 y 1, dependiendo del mecanismo de emisión. Este valor es muy importante por su influencia en la uniformidad de aplicación, así entre menor sea su valor más autocompensante es el emisor. En el caso de un emisor totalmente autocompensante $x = 0$ y el caudal es constante en un rango de presión de trabajo y la uniformidad teórica del sistema sería = 100%. En el caso de un emisor no autocompensante, el valor de x , dependerá del régimen de flujo que tenga lugar.

Teoría del flujo laminar: El valor teórico de () se obtiene de la ecuación de Darcy – Weisbach

y el Diagrama asociado e Moody: $hf = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g}$

Donde:

$hf \rightarrow$ Pérdida de carga (mca).

$f \rightarrow$ Factor de Fricción.

$L \rightarrow$ Longitud de la tubería (m).

$K \rightarrow$ Diámetro de la tubería (m).

$V \rightarrow$ Velocidad media del fluido (m/s).

$g \rightarrow$ Aceleración de la gravedad (m/s^2).

Para el flujo laminar ($R < 2000$), f viene dado por la ecuación de Haguen – Poiseuille, como:

$f = \frac{64}{R}$; donde R es el Número de Reynolds y se obtiene de: $R = \frac{V \times D}{\vartheta}$, donde ϑ es la viscosidad cinemática. Sustituyendo el valor de f en la ecuación de Darcy – Weisbach y resolviéndola en función del caudal (ecuación de Conservación de la Masa).

$Q = \frac{(g \times A \times D^2 \times Hf)}{32 \times \vartheta \times L}$; En esta ecuación puede verse que en el caso del flujo laminar perfecto el caudal (Q) es directamente proporcional a la pérdida de carga (Hf), por lo que el valor del exponente de descarga ($x = 0.5$).

El flujo a través de un orificio es un caso especial del régimen totalmente turbulento, y la ecuación del gasto deducida de la ecuación de Bernoulli es: $Q = A \times Cd \times \sqrt{2g \times H}$,

Donde:

$Q \rightarrow$ Caudal del orificio (L/h).

$A \rightarrow$ Área de la sección del orificio (m^2).

$Cd \rightarrow$ Coeficiente de descarga.

$H \rightarrow$ Diferencia de presiones (mca).

$g \rightarrow$ Aceleración de la gravedad (m/s^2).

En esta ecuación se comprueba que el caudal a través del orificio es proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia de presiones entre ambos lados del orificio y el valor de ($x = 0.5$) para un emisor dado. Resumiendo la teoría hidráulica establece que para un emisor de flujo laminar, el caudal varía directamente con la presión de trabajo es decir para estos casos el valor de ($x = 1$) e igualmente depende de la temperatura del fluido y de su viscosidad. Para

emisores de flujo perfectamente turbulento, el caudal varía con la raíz cuadrada de la presión de trabajo es decir ($x = 0.5$), independiente de la viscosidad y la temperatura.

I.4.1.- Fundamentos teóricos del diseño.

Debido a su carácter regular, el flujo en régimen laminar es más simple de analizar que el flujo en régimen turbulento sin embargo la mayoría de los problemas que se presentan en el diseño de redes hidráulicas a presión pertenecen al dominio del régimen turbulento. La identificación de uno u otro se realiza a través del Número de Reynolds (Re). Osborne Reynolds (1842 – 1867) nació en Belfast, Irlanda, y desarrolló experimentos que le permitieron exponer una serie de teorías que mantienen su vigencia en la actualidad.

$$Re = \frac{V \times \phi}{\nu} \quad (1.1)$$

Donde:

$V \rightarrow$ Velocidad media en la tubería (m/s).

$\phi \rightarrow$ Diámetro interior de la tubería (m).

$\nu \rightarrow$ Viscosidad Cinemática (m^2/s).

$Re \leq 2000$ Régimen Laminar

$2000 < Re < 4000$ Régimen de Transición

$Re \geq 4000$ Régimen Turbulento

$4000 \leq Re \leq 10 / (\epsilon/\phi)$ Régimen Turbulento Liso

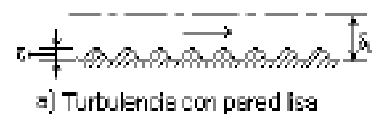
$10 / (\epsilon/\phi) < Re < 500 / (\epsilon/\phi)$ Turbulento intermedio.

$Re \geq 500 / (\epsilon/\phi)$ Régimen Turbulento Rugoso

ϵ : Rugosidad absoluta equivalente de la pared, m.

δ_L : Espesor de la capa límite, m.

En los sistemas de riego presurizados el agua se distribuye por medio de tuberías generalmente circulares, a sección llena y es aplicada a los cultivos por medio de emisores o aspersores que entregan el caudal por disipación de la energía. La formulación de Torricelli ofrece una aproximación acertada para estimar el caudal, válida para depósitos de grandes dimensiones con un orificio lateral de salida.



Aplicando Bernoulli entre A y B y tomando como referencia $Z = 0$. Siendo B la sección contraída y estando A y B abiertos a la atmósfera $P = P_{atm}$.

$$Z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = Z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g}.$$

Considerando

$$\frac{P_A}{\gamma} = 0; \quad \frac{V_A^2}{2g} = 0; \quad \frac{P_B}{\gamma} = 0.$$

Se llega a: $V_B = \sqrt{2g \times (Z_A - Z_B)}$

$$V_B = \sqrt{2gH} \quad (1.2)$$

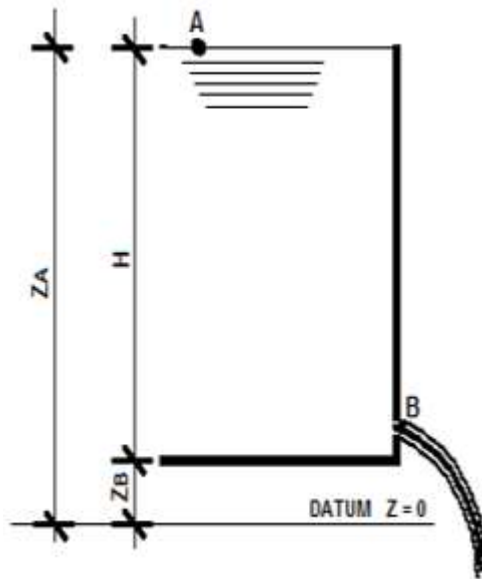


Figura 14: Estimación de la velocidad en orificios.

La evolución de estos dispositivos de emisión, que toman el agua desde tuberías a presión ha sido extremadamente amplia (desde emisores de riego localizado que entregan menos de 2 L/h hasta las toberas de aspersión que entregan más de 100 L/h), el funcionamiento hidráulico de los mismos varía desde el régimen Laminar hasta el de plena Turbulencia, López Sánchez (2001). El caudal que entrega una tobera de aspersión se define por:

$$Q = C_c \times C_v \times A_o \times \sqrt{2gH} \quad (1.3)$$

En la que el producto $(C_c \times C_v)$, es el coeficiente de descarga del aspersor (C_d) corregido en función del coeficiente de contracción del chorro y el coeficiente de velocidad respectivamente y $C_d \times A_o \times \sqrt{2g}$, es una constante (K_d) propia para cada aspersor en

función de las características geométricas. Admitiendo que el dispositivo trabaja en régimen turbulento ($x = 0.5$), la ecuación (I.2) se puede transformar en:

$$Q = Kd \times H^x \quad (I.4)$$

Donde (x) es el exponente de descarga del aspersor. De acuerdo con López Sánchez (2001), el valor de (x) estaría comprendido entre 0.5 y 1.0, en dependencia de si el dispositivo de emisión trabaja en régimen Laminar o en régimen Turbulento, sin embargo debido a la existencia de dispositivos de emisión que permiten una limitación del caudal con el aumento de la presión (como ocurre con los emisores autocompensantes utilizados en el riego por goteo), el valor de (x) puede ser incluso inferior a 0.5. La tabla 3 muestra los valores del exponente de descarga según el tipo de emisor y el régimen de flujo.

Tabla 12: Valores de (x) propuestos por Boswell (1990).

Régimen de flujo	(x)	Tipo de emisor
Conducto variable.	$0.0 \leq x \leq 0.3$	Autocompensantes
Flujo vorticial.	0.4	Emisores Vortex
Flujo turbulento rugoso.	0.5	De Orificio y de Laberinto
Flujo parcialmente turbulento.	$0.6 \leq x \leq 0.7$	De largo conducto y de Espiral
Flujo parcialmente laminar.	$0.8 \leq x \leq 0.9$	Microtubo
Flujo perfectamente laminar.	1.0	Flujo Capilar

De acuerdo con (Boswell, 1990 “) el valor real de (x) para un emisor se puede determinar experimentalmente haciendo funcionar el emisor a dos presiones diferentes H_1 y H_2 , dentro del rango de presiones de trabajo y midiendo los caudales Q_1 y Q_2 , luego se dibujan en papel logarítmico los pares ($H_1 ; Q_1$) y ($H_2 ; Q_2$) y se mide la pendiente de la recta dibujada entre los dos puntos. También se puede obtener derivando algebraicamente la ecuación (I.4)

$$X = \frac{\log(\frac{Q_1}{Q_2})}{\log(\frac{H_1}{H_2})} \quad (I.5)$$

La constante (Kd) también se puede obtener despejando de (I.4):

$$Kd = \frac{Q}{H^x} \quad (I.6)$$

Durante el diseño hidráulico, es importante analizar las dependencias entre las variaciones relativas de caudal y de presión, con el objetivo de garantizar una adecuada uniformidad de emisión. En este sentido la variación elemental del caudal (dQ) correspondiente a una variación elemental de la presión (dH), puede obtenerse a partir de (I.4):

$$\partial Q = Kd \times x \times H^{x-1} \partial H \quad (I.7)$$

En el diseño es frecuente admitir una variación relativa del caudal, referida al valor nominal o de diseño de los dispositivos de emisión, es decir: ($\partial Q/Q \leq 0.10$) de manera que, como en régimen de plena turbulencia ($x = 0.5$); la variación relativa de presión referida igualmente al valor nominal del dispositivo de emisión se obtiene de sustituir (I.6) en (I.7):

$$\partial H = 0.2H \quad (I.8)$$

Si el régimen fuera Laminar ($x = 1$) por lo tanto

$$\partial H = 0.1H \quad (I.9)$$

Esto pone de manifiesto la influencia del tipo de dispositivo de emisión y el régimen de flujo en la uniformidad de emisión de los emisores en la parcela de riego. Sin embargo, la experiencia en el diseño ha demostrado que lo anteriormente expuesto no es el único criterio que se debe considerar al diseñar una parcela de riego. La figura 4 que le sigue, muestra las variaciones de caudal de un emisor de goteo en función de la variación de presión para valores $0 \leq x \leq 1$, caudal del emisor de 4 L/h y la presión de trabajo (mca) $8 \leq H \leq 12$

EMISOR AUTOCOMPENSANTE EXPONENTE: $X=0$ PRESIÓN DE TRABAJO: 10 mca. VARIACIÓN DE PRESIÓN: ± 2 mca. CAUDAL NOMINAL: 4 L/h
EMISOR DE FLUJO TURBULENTO EXPONENTE: $X=0.5$ PRESIÓN DE TRABAJO: 10 mca. VARIACIÓN DE PRESIÓN: ± 2 mca. CAUDAL NOMINAL: 4 L/h
EMISOR DE FLUJO LAMINAR EXPONENTE: $X=1.0$ PRESIÓN DE TRABAJO: 10 mca. VARIACIÓN DE PRESIÓN: ± 2 mca. CAUDAL NOMINAL: 4 L/h VARIACIÓN DE CAUDAL: ± 0.8 L/h

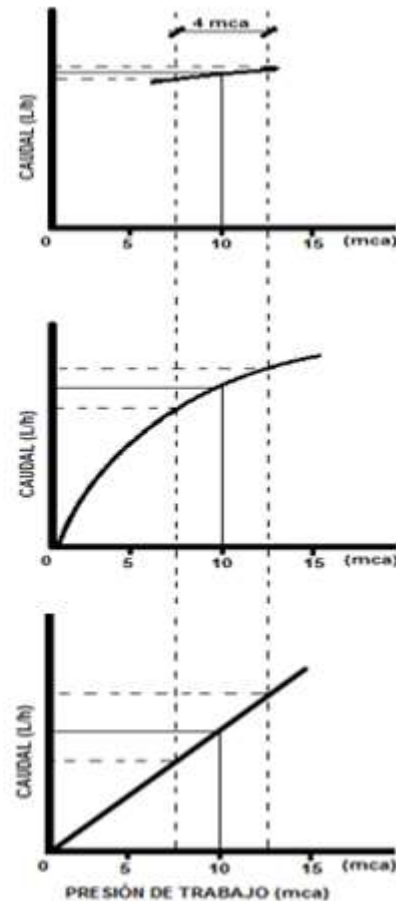


Figura 15: Variaciones de caudal del emisor, Boswell (1990).

En el diseño de sistemas de riego localizado los criterios son más exigentes, para estos casos no es aplicable el criterio de uniformidad de Christiansen, para ellos se define un nuevo coeficiente de uniformidad (CU), el cual puede ser utilizado para la evaluación de instalaciones en funcionamiento así como para el diseño de nuevas instalaciones. Este parámetro es una condición que se impone en el diseño agronómico y correlaciona factores constructivos e hidráulicos, fue sugerido por (ASAE EP405), citado por (Boswell, 1990 “) y aceptado por el Servicio de Conservación de Suelos de los EE.UU.

$$CU = \left[\left(1 - \frac{1.27 \times C_{vf}}{\sqrt[2]{e}} \right) \times \left(\frac{Q_{mín}}{Q_{med}} \right) \times 100 \right] \quad (I.10)$$

Donde:

C_{vf} . – Coeficiente de variación de fabricación ($t \times 1$).

e . – Número de emisores que humedecen una misma planta (u).

$Q_{mín}$. – Caudal mínimo admisible en la parcela de riego (L/h).

Q_{med} . – Caudal medio de los emisores en la parcela de riego (L/h).

El término $\left(1 - \frac{1.27 \times Cvf}{\sqrt[2]{e}}\right)$ agrupa los factores constructivos.

El término $\left(\frac{Q_{mín}}{Q_{med}}\right)$ agrupa los factores hidráulicos.

Tres razones justifican la utilización de (I.10) en lugar de la (I.8), utilizada en el diseño de los sistemas de riego por aspersión: El hecho de que el diámetro de salida de los emisores de goteo es mucho menor que el de los aspersores, generalmente su valor oscila entre $0.8 \leq \phi_{boq.} \leq 1.2 \text{ mm}$, esto implica que el riesgo de obturación es mucho mayor en los emisores de riego localizado; Además, es un hecho real que no todos los emisores de goteo salen de la fábrica con el mismo diámetro de salida, debido al desgaste que experimentan los moldes durante el proceso de fabricación, este detalle afecta la uniformidad de entrega de los emisores en la parcela de riego, (al tener en cuenta para estimar (CU) , el número de emisores que humedecen una misma planta (e), el factor constructivo es tenido en cuenta con mayor rigor en los sistemas de riego localizado; por último y no menos importante, resalta el hecho de que a diferencia de lo que ocurre en los sistemas de riego por aspersión, en los sistemas de riego localizado la incidencia de los vientos en la forma y dimensiones de los bulbos de húmedos que se generan es significativamente menor, principalmente en las técnicas de goteo y exudación.

Con relación al factor hidráulico, en el mismo se tiene en cuenta la relación entre el caudal mínimo permisible en la parcela y el caudal nominal o de diseño del emisor, por medio de estimar las pérdidas por rozamientos que tienen lugar en la red tuberías que conforman la parcela de riego, así como los desniveles topográficos debidos al relieve; Comprobando que la presión mínima dentro de la parcela de riego sea mayor o igual que un valor mínimo denominado tolerancia de presiones.

Con los avances tecnológicos alcanzados, el componente hidráulico de (CU) ha sido mejorado significativamente con el surgimiento de los emisores autocompensantes. Sin embargo, a pesar de la gran gama de éstos que existen en el mercado, el riesgo de obturación todavía es un problema no totalmente resuelto y las soluciones generalmente implican costosos sistemas de filtrado en dependencia de la calidad del agua de riego.

I.5.- Normas y Regulaciones consideradas en la práctica del diseño.

NC 48-03:83 Ingeniería Hidráulica. Riego y drenaje. Términos y definiciones.

Generalidades. Los términos que en esta norma se establecen se agrupan de la forma siguiente:

1. Forma, composición y estructura y mejoramiento de los suelos.
2. Estudios previos.
3. Diseño de canales. Obras de cabecera y Estructura de canales.
4. Sistema de riego y distribución del agua de riego.
5. Diseño y construcción del sistema de drenaje.
6. Investigaciones hidráulicas.
7. Conservación de los suelos.
8. Pozos y bombeo.
9. Hidrología.

NC 48-11:83 Ingeniería hidráulica. Riego y drenaje. Especificaciones de proyecto.

Esta norma establece las especificaciones de proyecto de los sistemas de riego por aspersión para unificar los criterios de diseño.

Generalidades: En la elaboración de un proyecto de riego por aspersión se tendrán en cuenta los proyectos típicos siguientes:

1. Soportes de apoyo para codos horizontales de distintos diámetros y ángulos.
2. Soportes de apoyo para codos cóncavos y convexos verticales para todos los diámetros.
3. Registros de hidrantes, válvulas, ventosas y desagües para distintos diámetros, pendientes y otras conducciones.

1.6.- Criterios de Selección según complejo Agua – Suelo – Planta – Clima.

De acuerdo con FAO Training manual # 5 (1990), para seleccionar un método de riego apropiado es necesario evaluar las ventajas e inconvenientes de cada una de las técnicas de riego posibles a utilizar, de acuerdo con las condiciones específicas de la superficie agrícola que se pretende beneficiar. Desafortunadamente esta no es una elección sencilla, en lo que sigue se abordan algunos indicadores que deben considerarse:

1. **CONDICIONES NATURALES:** Se refiere los impactos que puede generar la implementación de una determinada técnica de riego en los suelos, el clima y las fuentes de agua vinculados a la inversión agrícola. En este sentido se pueden resumir los siguientes indicadores:

Tipo de suelo. Los suelos arenosos, por ejemplo, tienen una baja capacidad de almacenamiento y una alta velocidad de infiltración básica y por ello admiten dosis de riego pequeñas con alta frecuencia de aplicación, principalmente cuando se trata de suelos poco profundos. En estas circunstancias son preferibles las técnicas de riego por aspersión y localizado y no las de riego superficial. Los suelos arcillosos y medios son apropiados para los tres métodos de riego, aunque las estadísticas muestran que las técnicas de riego superficial son las más comúnmente utilizadas en estos casos. Estos autores también refieren que para los suelos arcillosos con baja velocidad de infiltración el método de riego superficial es preferido, y concluyen que en presencia de suelos estratificados o varios tipos de suelo en una misma explotación las técnicas de aspersión y localizado son más recomendadas, especialmente esta última que ha obtenido su fama precisamente por los resultados que se obtienen con este método de riego en los llamados suelos difíciles.

Pendiente del suelo: En el caso de suelos con relieve llano o relativamente ondulado que requiera cierta nivelación las técnicas de riego por aspersión y localizado son más convenientes. La excepción ocurre en el caso de las plantaciones de arroz cultivado en sistemas ingenieros o sami – ingenieros.

El clima: En condiciones de velocidades del viento fuertes las técnicas de riego superficial son las preferidas, en determinados casos también se pueden utilizar algunas técnicas de riego localizado (goteo y exudación) y los conocidos sistemas LEPA acoplados a los sistemas de riego por aspersión (Pivote Central). En las áreas donde se aplican riegos suplementarios, las técnicas de riego por aspersión y localizado son más aplicables que las técnicas de riego superficial, debido a su mayor flexibilidad y adaptabilidad a las variaciones de las demandas de agua en las parcelas de riego.

Disponibilidad de agua: Cuando el volumen de agua disponible para el riego no es suficiente es necesario recurrir a técnicas de riego de elevada eficiencia en la utilización del agua, en estos casos las técnicas de riego por aspersión (Pivote Central) y de riego localizado (goteo, microaspersión y exudación) son preferidas a las técnicas de riego superficial. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la eficiencia en el uso del agua de riego depende también del conocimiento, las habilidades y el empeño de los regadores.

Calidad del agua: Cuando el agua de riego contiene muchos sedimentos las técnicas de riego superficial son preferidas a las de aspersión y localizado debido al riesgo de obturación de los aspersores y emisores de riego, especialmente en los emisores debido a que el diámetro de los orificios es mucho menor en el caso de estos últimos. Lo contrario ocurre cuando el agua de riego contiene sales disueltas, en estos casos son particularmente preferidas las técnicas de riego localizado debido al manejo de sales que se logra en el mismo. No obstante, las técnicas de riego por aspersión convencional son las más eficientes cuando se desean realizar lavados de recuperación y/o mantenimiento.

2. **TIPO DE CULTIVO:** El método de riego superficial puede ser empleado en la inmensa mayoría de los cultivos a diferencia de las técnicas de riego por aspersión y localizado las cuales se emplean preferiblemente en cultivos de alto valor comercial como es el caso de algunas hortalizas y vegetales y cultivos cítricos y frutales; esto es debido a que en estos es mayor el costo de la inversión inicial y por esta razón en muy pocos casos y por razones justificadas se emplean en cultivos de bajo valor comercial. Se puede generalizar que el riego localizado con excepción del cultivo de arroz y los pastos, es adecuado para el riego de cultivos individuales, árboles frutales y en general cultivos sembrados en hilera como la caña de azúcar.
3. **TIPO DE TECNOLOGÍA:** En general las técnicas de riego por aspersión y localizado son más complicadas que las técnicas de riego superficial, la adquisición del equipamiento que incluyen las modernas tecnologías requiere una mayor inversión inicial en los primeros, así como los requerimientos de manejo y mantenimiento, combustibles, lubricantes y piezas de repuestos, las cuales, como regla general, incluyen un componente en monedas convertibles. Particularmente la técnica de riego superficial a pequeña escala requiere equipamientos menos sofisticados para la construcción y el mantenimiento que las técnicas de aspersión y localizado. A menos que se utilicen instalaciones de bombeo, los costos de mantenimiento son menores y menos dependiente de las disponibilidades de monedas convertibles.
4. **EXPERIENCIA PREVIA EN LAS ACTIVIDADES DE IRRIGACIÓN:** La selección de la técnica de riego más apropiada también depende de la tradición en el uso de la tecnología por parte de los operadores – regadores del sistema. En este sentido, la

introducción de una tecnología sofisticada pero desconocida pudiera no se aceptada por los campesinos y generar complicaciones indeseables, por ejemplo, el mantenimiento y las reparaciones del moderno equipamiento pudiera resultar un problema complicado y por consiguiente los costos pudieran resultar superiores a los beneficios. En algunos casos resulta más fácil mejorar una técnica de riego tradicional que encarar la introducción total de una nueva y sofisticada tecnología de riego.

5. **LABORES REQUERIDAS:** Las técnicas de riego superficial requieren mayores inversiones en la construcción, operación y mantenimiento del sistema de riego, que las técnicas de riego por aspersión y localizado. El riego superficial requiere de importantes labores para la nivelación de la superficie del terreno, así como un nivel de organización tal que garantice el mantenimiento y el manejo de agua de riego fundamentalmente cuando se trata de grandes explotaciones. A diferencia de las técnicas presurizadas en las cuales las labores de nivelación son significativamente menores y a veces son más necesarias para el drenaje que para el riego. Lo mismo sucede con las labores de mantenimiento del sistema y manejo del agua de riego.
6. **RELACIÓN COSTO – BENEFICIO:** Antes de seleccionar la técnica de riego se debe realizar una estimación de los costos y beneficios previstos para cada opción de riego, y comparar los beneficios esperados (rendimientos / ha) con los costos previstos para la construcción, montaje de la instalación, de operación y de mantenimiento.

Capítulo II: Procedimientos de diseño de sistemas de Riego Presurizado.

II.1.- Cálculo de la Necesidades de agua con riego presurizado.

Varios autores se han referido a la importancia del diseño agronómico en todo proyecto de riego, de nada sirven unos afinados cálculos hidráulicos y una apropiada selección de los equipos de impulsión, etc., si desde el diseño agronómico no se garantiza suministrar con una óptima eficiencia las necesidades hídricas del cultivo durante el período de máxima demanda, evitando al mismo tiempo la salinización del suelo por falta de lavado o la insuficiencia en el volumen de suelo humedecido por instalar un número equivocado de emisores.

Este objetivo se logra utilizando en cada caso dispositivos de emisión que apliquen un caudal determinado en función de las propiedades físicas del suelo y de la dosis de riego a aplicar, la forma que presenten las zonas mojadas suministrará elementos de juicio para elegir la disposición de laterales más correcta. La respuesta del cultivo a la aplicación del riego, así como otros criterios de tipo económico como el costo del agua, el valor de la cosecha, etc., son la base para decidir la eficiencia de aplicación.

Por otra parte, en los sistemas de riego localizado a diferencia de lo que ocurre en los sistemas de riego por aspersión, la tolerancia del cultivo a la salinidad y la calidad del agua de riego, pueden hacer incrementar las necesidades netas de riego con alguna fracción de lavado, esta cantidad deberá mayorarse con la eficiencia de aplicación para garantizar que las plantas que menos agua recibe, dispongan de suficiente cantidad para satisfacer las necesidades estimadas (Necesidades totales de riego). Para suministrar estas necesidades se pueden elegir varias combinaciones de dosis y frecuencias que se deberán tantear en unión del caudal de los emisores a fin de determinar que número de ellos se necesitaría para conseguir el volumen de suelo mojado adecuado.

Disponer de una buena estimación de las necesidades de riego es imprescindible para el diseño de cualquier sistema de riego, en éste caso lo que interesa conocer son las necesidades punta, pues las instalaciones deben diseñarse para satisfacer las necesidades pico, aunque para otros tipos de trabajo interesa conocer las necesidades estacionales de riego, como por ejemplo en los estudios técnico-económicos. Los procedimientos básicos para estimar las necesidades de riego de los cultivos son los mismos para cualquier técnica de riego, pero cuando se emplean técnicas de riego

localizado, deben utilizarse posteriormente coeficientes correctores que permiten estimar con mayor rigor las necesidades de agua de los cultivos.

Estimación de la evapotranspiración de diseño.

La evapotranspiración no es más que la suma de dos fenómenos estrechamente relacionados entre sí, la evaporación y la transpiración. La primera, es la evaporación directa del agua desde el suelo en el cual se encuentran establecidas las plantas hacia la atmósfera y la transpiración es la evaporación desde las estomas de la planta del agua absorbida por estas. Anteriormente se utilizaban varios métodos para estimar la evapotranspiración: Blaney-Criddell, Radiación, de Penman, el del Tanque Evaporímetro clase “A”, etc. Todos unos de estos métodos tienen sus características propias que lo hacen preferido o no por cada usuario, el método FAO Penman – Monteith, propuesto por consultores de la FAO, se presenta como el que ofrece resultados más precisos, aunque el del Evaporímetro clase “A”, es el que más se utiliza en las condiciones de Cuba, este último mide la evaporación realmente ocurrida en la superficie libre del agua en un tanque de dimensiones estandarizadas que se instala siguiendo normas establecidas. Se reconocen tres formas diferentes de evapotranspiración, estas son:

1. Evapotranspiración Potencial: Es la cantidad de agua evapotranspirada por un cultivo de poca altura que cubre totalmente la superficie del suelo, posee una altura uniforme y crecimiento activo cuando el estatus del potencial hídrico del suelo es tal que permite la máxima extracción de agua.
2. Evapotranspiración máxima: Es la cantidad de agua evapotranspirada por un cultivo cualquiera en condiciones de potencialidad, es decir, cuando el estatus del potencial hídrico del suelo es tal que permita la máxima extracción de agua.
3. Evapotranspiración real: En contraposición con la evapotranspiración máxima, es la cantidad de agua evaporada por un cultivo en condiciones en que la oferta es inferior a la demanda, es decir es el consumo de agua de un cultivo cualquiera bajo condiciones restrictivas de conducción de la plantación y de la conducción del riego.
4. El método del tanque evaporímetro clase “A” puede emplearse para estimar cualquiera de las tres formas reconocidas de evapotranspiración, las formas de evapotranspiración que más interesan con fines de diseño son la evapotranspiración máxima y la real, el empleo de una u otra en la práctica, depende de la técnica de riego que se utilice. Cuando

se emplean técnicas de riego superficial o por aspersión resulta suficiente considerar las necesidades hídricas del cultivo iguales a la evapotranspiración real y así mediante la disminución de la frecuencia de riego, minimizar los costos de explotación e inversión inicial, el uso de la evapotranspiración máxima como base de la estimación, podría ocasionar la falta de rentabilidad de la producción y en el peor de los casos la pérdida total o parcial del cultivo y de la estructura del suelo como consecuencia de la relativa alta frecuencia del riego.

Otro es el problema al diseñar sistemas de Riego Localizado, pues a ellos les son inherentes la alta frecuencia del riego y pueden garantizar al cultivo un potencial hídrico en el suelo consecuente con su máximo consumo, sin provocar un incremento significativo de los costos de explotación e inversión inicial, ni deteriorar la estructura del suelo o dañar al cultivo. Con los RLAF, si el cultivo responde bien a los bajos potenciales hídricos del suelo, se alcanzan incrementos significativos de la producción y en consecuencia el sistema incrementa su rentabilidad.

Probabilidad de diseño de la evapotranspiración.

Al emplear las técnicas de riego tradicionales se ha convenido en utilizar para los efectos de diseño la evapotranspiración al 25 %P (que se corresponde con el 75 %P de la lluvia), cuestión esta que se justifica ya que una disminución de la probabilidad de ocurrencia de la evaporación, provocaría las consecuencias anteriormente citadas. Algo diferente ocurre al utilizar las técnicas de Riego Localizado, donde la probabilidad de diseño apenas influye en los costos de inversión inicial y explotación de los sistemas, aquí es más conveniente utilizar la evapotranspiración al 10 %P y la lluvia al 90 %P y con esto se garantiza cubrir las demandas máximas del cultivo el 90 % de los años. El cálculo de la evapotranspiración no presenta diferencias respecto al riego tradicional, ésta se calcula utilizando los coeficientes bioclimáticos del cultivo y los valores de la evaporación observada en el tanque y llevada a la probabilidad de diseño. El producto así obtenido se corrige por un coeficiente debido a la localización del riego obteniendo así la evapotranspiración para Riego Localizado.

Autores como Hernández Abreu citado por Pizarro (2000), plantean que es apropiado considerar un coeficiente de variabilidad climática ($1.15 \leq K_{VC} \leq 1.2$) para tener en cuenta el hecho de que los valores de evapotranspiración estimados corresponden a valores ya medidos y no a los máximos previstos durante el ciclo vegetativo de los cultivos. En todo

caso cuando se utilizan los valores medidos en las cubetas y éstos son transformados estadísticamente a un valor de probabilidad de ocurrencia, no es propicio tener en cuenta este coeficiente, caso contrario a cuando se obtiene la ETo por medio de la ecuación FAO – Penman – Monteith.

Otros autores plantean además afectar la evapotranspiración por un factor de corrección por Advección, el cual depende del tamaño de la zona de riego, el valor de este coeficiente para diferentes condiciones y cultivos no será tenido en cuenta hasta tanto se precise su cuantía para las condiciones de Cuba.

Necesidades netas.

Es práctica habitual que las necesidades netas de riego crítica se hagan coincidir con el consumo de agua diario, es decir con la evapotranspiración, el valor de la Evaporación se puede obtener de la curva de 10 % de probabilidad de ocurrencia confeccionada con la serie del mes punta. De lo contrario se puede obtener ETo por medio de la ecuación FAO - Penman – Monteith o por medio de Cropwat versión 8.0 que son herramientas más rigurosas. El coeficiente de cultivo (K_c) se determina para las tres fases del ciclo vegetativo y se toma para el diseño el mayor de los tres valores. Este coeficiente es adimensional y varía mayormente con las características del cultivo y muy poco con las condiciones climáticas, por esa razón se aceptan las extrapolaciones de los valores de dicho coeficiente para un mismo cultivo en diferentes regiones climáticas. Es básicamente la relación entre $\frac{ET_c}{ET_o}$, e integra 4 efectos principales los cuales distinguen la (ET_c) de la (ET_o).

1. La altura del cultivo: *Esta característica influye en la resistencia aerodinámica del cultivo y el intercambio de vapor entre este y la atmósfera.*
2. La reflectancia de la superficie del suelo y de las hojas (Albedo): Es afectada por la sombra que provoca el follaje de los cultivos sobre el suelo y por la retención de humedad en el suelo que se favorece con esta sombra. Es decir influye en el valor de la radiación neta (R_n).
3. La resistencia del follaje del cultivo: Influye en la transferencia de vapor entre las hojas y la atmósfera.
4. La evaporación de la superficie no cultivada incluida dentro del marco de siembra del cultivo.

5. El coeficiente K_c integra los efectos de las características que diferencian el cultivo a irrigar del cultivo de referencia, por lo tanto su valor es diferente para cada cultivo y también para cada etapa de crecimiento de estos., ofrecen valores de (K_c) para diferentes estadios del cultivos y condiciones climáticas estándar (cultivos no estresados y bien manejados en climas sub-húmedos ($HR_{mín} \approx 45\%$, $V_v \approx 2 \text{ m/s}$), los mismos pueden ser utilizados para el cálculo de (ET_c).

Los factores que afectan K_c se pueden resumir en:

1. Características del cultivo: La altura del cultivo, el follaje y el marco de siembra. Las altas densidades de siembra en cultivos altos como el Maíz, la Caña de Azúcar y el Sorgo, infiere valores de (K_c) superiores a 1 hasta en un 20 %
2. Factores climáticos: La humedad relativa, la velocidad del viento. Para la mayoría de los casos se cumple que al aumentar la velocidad del viento disminuye la humedad del aire, por esta razón generalmente en los climas áridos y condiciones de vientos fuertes los valores de (K_c) son mayores que en las regiones húmedas y velocidades del viento calmas.
3. Evaporación de la superficie del suelo: Para cultivos pequeños y de poca sombra el valor de (K_c) esta en función de la frecuencia de riego. Cuando el suelo está húmedo aumenta la evaporación del suelo y el valor de (K_c) puede exceder de 1, lo contrario ocurre cuando el suelo está seco, el valor de (K_c) puede llegar a valores de 0.1.
4. Ciclo vegetativo: En la medida que el cultivo se desarrolla va aumentando su altura y su follaje y como consecuencia la sombra que genera sobre la superficie del suelo. Por ello la evapotranspiración difiere durante los distintos estadios de las plantas y con ello varia también (K_c).
5. En el caso de la fase inicial del cultivo, ($K_{c_{ini}}$), puede ser obtenido en función de la frecuencia de riego y de la lluvia caída durante el periodo, así como de la (ET_o) y la lámina de riego infiltrada (Dr). Para eventos de humedecimiento de ligero a medio ($Dr \leq 10 \text{ mm}$) se puede obtener a partir de la figura que se muestra a continuación. Válida para cualquier tipo de suelo e $Dr \leq 10 \text{ mm}$ (pj Riego por Microaspersión y Pívor).

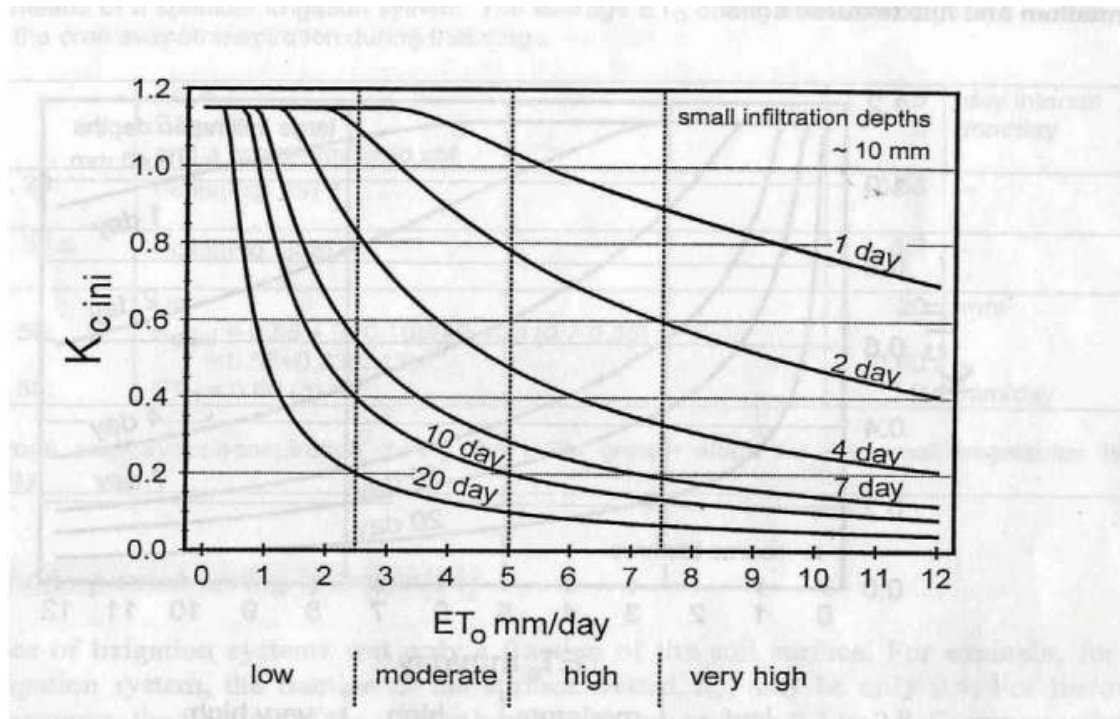


Figura 16: Valor promedio de ($K_{c\text{ ini}}$) en función de (ET_0), y ($Dr \leq 10$ mm).

$K_{c\text{ ini}}$, también puede ser obtenido para eventos de humedecimiento mayores ($Dr \geq 40$ mm), en estos casos la cantidad de agua disponible en la superficie del suelo para ser evaporada es mucho mayor y mayor será el tiempo necesario para consumirla. Esto infiere que $K_{c\text{ ini}}$ será mayor, y como el tiempo requerido para evaporar la humedad disponible en la superficie del suelo depende también de la capacidad de almacenamiento de ese suelo, es necesario tener en cuenta el tipo de suelo para poder ajustar el valor de $K_{c\text{ ini}}$. Esta corrección se realiza con la figura 6 y que es válida para suelos de textura arenosa.

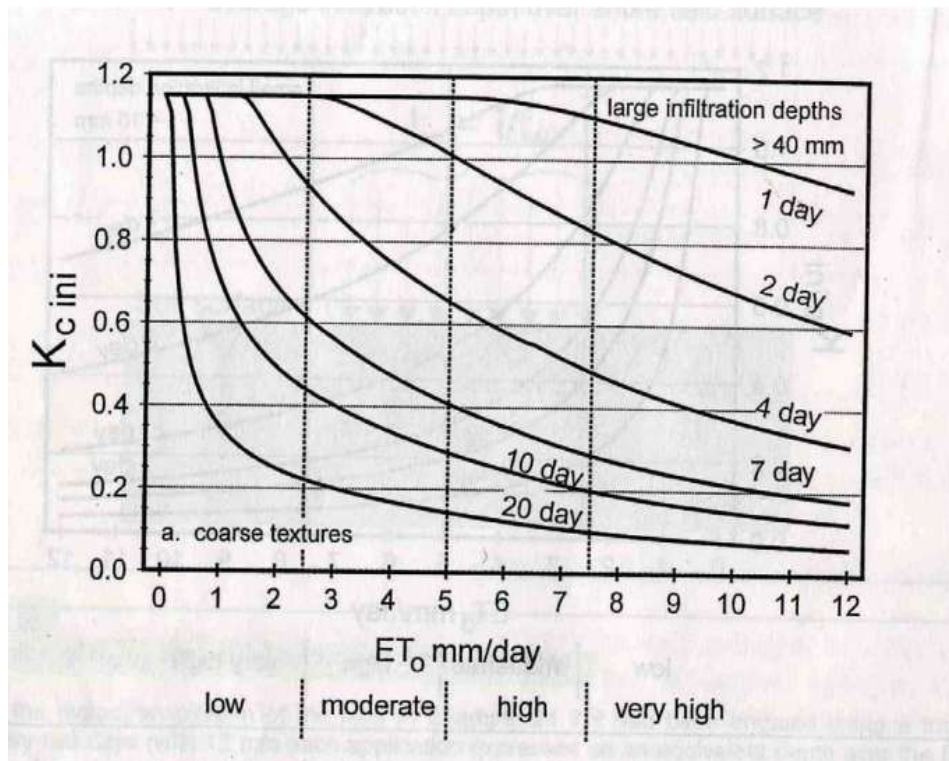


Figura 17: Valor promedio de K_{cini} , en función de (ET_0), y ($Dr \geq 40$ mm).

Para el caso de suelos de textura media y fina y ($Dr \geq 40$ mm), el valor se de K_{cini} se puede obtener a partir de la Figura 15 que le sigue.

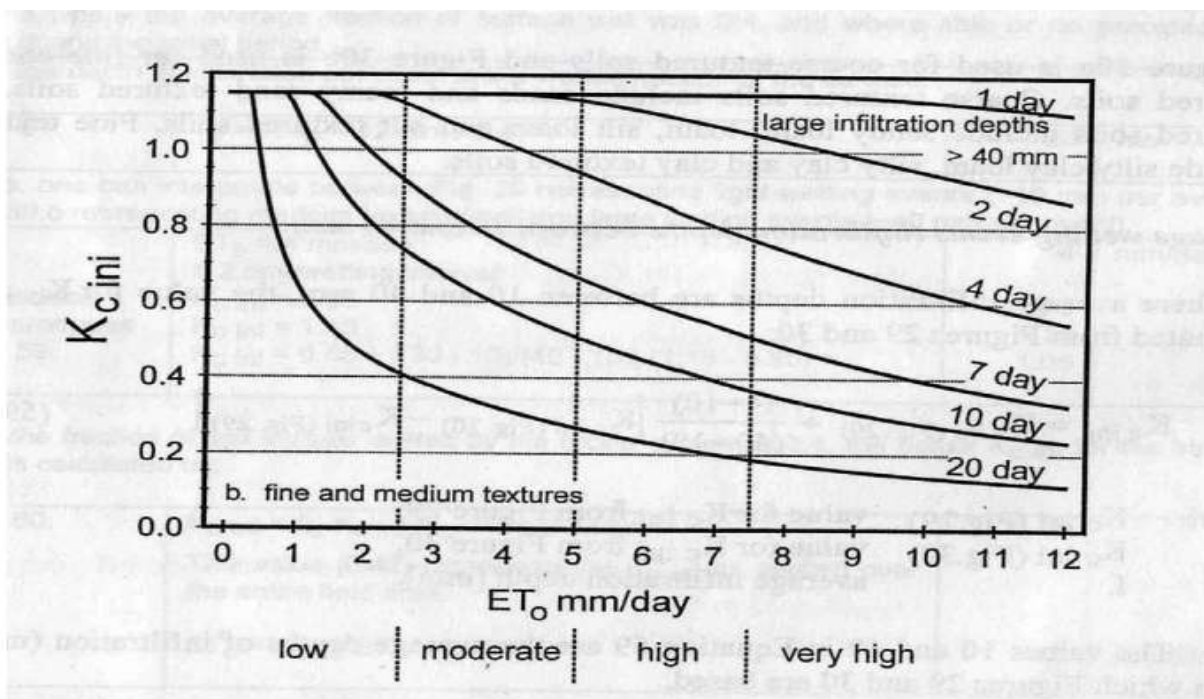


Figura 18: Valor promedio de K_{cini} , en función de (ET_0), y ($Dr \geq 40$ mm).

Para ($10 \text{ mm} < Dr < 40 \text{ mm}$), el ajuste de Kc_{ini} , se realiza interpolando entre las dos situaciones a partir de la siguiente expresión y teniendo en cuenta la figuras 5, 6 ó 7 según corresponda.

$$K_c(ini) = Kc_{ini}[Fig. 5] + \frac{Dr-10}{40-10} \times (Kc_{ini}[Fig. 6 \text{ ó } 7] - Kc_{ini}[Fig. 5]) \quad (II.1)$$

En algunas técnicas de riego solamente humedecen una porción de la superficie del suelo que es sombreada por el cultivo (f_w) y (Dr) debe ser afectada por este factor, así: $Dr = \frac{Dr}{(f_w)}$.

En la Tabla 13 se sugieren algunos valores.

Tabla 13: Valores comunes de (f_w) para diferentes técnicas de riego.

Eventos de humedecimiento	Fracción de la superficie humedecida del suelo (f_w)
Precipitación, riego por aspersión, Riego por bandas, riego por terrazas.	1.0
Riego por surcos estrechos.	0.6 a 1.0
Riego por surcos anchos.	0.4 a 0.6
Riego por surcos alternos	0.3 a 0.5
Riego por goteo	0.3 a 0.4

Los valores de Kc_{ini} obtenidos por el procedimiento anterior deben ser también ajustados en función de este porcentaje realmente humedecido $Kc_{ini} = f_w \times Kc_{ini}$ en este sentido para obtener un valor más real de Kc_{ini} obtenido por el procedimiento anterior,

Para los coeficientes de cultivo correspondientes a las fases media y final de crecimiento y desarrollo, se determinan los coeficientes $K_c (med)$ y $K_c (fin)$ respectivamente. En la bibliografía 1, Allen (1998), se ofrecen los valores de $K_c (med)$ y $K_c (fin)$ para las respectivas fases media del ciclo vegetativo de la mayoría de los cultivos agrícolas, los valores propuestos fueron obtenidos por el Comité de Consultores de la FAO, los mismos se corresponden con cultivos que crecen en condiciones normales y considerando ($HR_{min} = 45\%$), ($Vv = 2 \text{ m/s}$), y para la altura máxima que alcanzaría el cultivo en esas condiciones. En los climas áridos los vientos predominantes suelen ser mucho más fuertes, lo contrario de lo que ocurre en los climas húmedos. Estas razones conllevan a que los valores

propuestos deban ser corregidos por la expresión siguiente, válida para: ($HR_{min} \neq 45\%$) y ($u_2 \neq 2 \text{ m/s}$).

$$K_c(med) = K_c(med)_{tabla} + [0.04 \times (u_2 - 2) - 0.004 \times (HR_{min} - 45)] \times \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (II.2)$$

$$K_c(fin) = K_c(fin)_{tabla} + [0.04 \times (u_2 - 2) - 0.004 \times (HR_{min} - 45)] \times \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (II.3)$$

Donde:

$K_c(med)_{tabla}$.- Valor de $K_c(med)$ tomado de la tabla 5. Los valores de $K_c(med)$ son menos afectados por la frecuencia de eventos de humedecimiento que $K_c(ini)$. Para eventos de humedecimientos menores de 3 días y cuando $K_c(medio)_{tabla} < 1$ a $1.1 \leq K_c(med) \leq 1.3$

$K_c(fin)_{tabla}$.- Valor de $K_c(fin)$ tomado de la tabla 5, en la misma se ofrecen los valores de $K_c(fin)$ para la fase final del ciclo vegetativo de la mayoría de los grupos de cultivos agrícolas, este parámetro refleja las prácticas de cultivo y de manejo del agua de riego en esta fase del ciclo vegetativo de los cultivos. Para cultivos que son irrigados con alta frecuencia hasta el comienzo de la cosecha el valor de $K_c(fin)$ es mayor que en los casos en que los cultivos no son irrigados durante la etapa final de su ciclo vegetativo.

V_v .- Valor medio de la velocidad del viento durante la fase media del ciclo vegetativo, tomada a 2 m de altura: generalmente $1 \text{ m/s} \leq u_2 \leq 6 \text{ m/s}$

h .- Altura promedio de la planta durante la fase media del ciclo vegetativo: generalmente $0.1 \text{ m} < h < 10 \text{ m}$, la tabla 5 ofrece valores de h para los diferentes cultivos (grupos de cultivos), los mismos podrán ser utilizados solamente cuando no existan registros confiables de informaciones de campo.

HR_{min} .- Valor medio de la HR_{min} durante la fase media del ciclo vegetativo: generalmente $20 \% \leq HR_{min} \leq 80 \%$

Las necesidades netas hídricas punta (Nn) (mm/día) se obtienen por:

$$Nn = Ev_{10\%p} \times Kp \times Kc \times Kl \times Ka = ET_o \times Kc \times Kl \times Kvc \times Ka \quad (II.4)$$

Donde:

$Ev_{10\%p}$.- Es la evaporación en (mm/día), obtenida de la serie media mensual del mes de máxima demanda al 10 % de probabilidad de ocurrencia.

Kc .- Es el coeficiente de cultivo (el mayor de las fases del ciclo vegetativo).

Ka . - Es el coeficiente de Advección (se toma la unidad hasta tanto se precise su valor para las condiciones de Cuba).

Kvc . - Es el coeficiente de variabilidad climática (1.15 a 1.2), al igual que la probabilidad de ocurrencia de la evaporación este parámetro tiene en cuenta que además de la variación climática interanual existe otra diaria, también se puede aplicar el pronóstico de riego diario.

Kp . - Es el coeficiente de corrección de la cubeta en función de la distancia a barlovento, la humedad relativa media y la velocidad máxima de los vientos a 2m de altura.

Kl . - Es el coeficiente debido al efecto de la localización del riego.

Este coeficiente ha sido determinado por numerosos procedimientos, hay varios autores que basan su cálculo en la fracción de la superficie sombreada por la cubierta vegetal a mediodía en el solsticio de verano respecto a la superficie total. Estos métodos suponen que, a efectos de evapotranspiración, el área sombreada se comporta casi igual que la superficie del suelo en riegos no localizados, mientras que el área no sombreada, elimina agua con una intensidad mucho menor. No está comprobado que entre este coeficiente y la fracción del área sombreada por el cultivo exista una relación lineal como proponen dichos autores, por lo que es recomendable al aplicar dichas fórmulas no perder de vista su significado real. En la práctica del diseño este coeficiente se estima según la expresión de DECROIX.

$$Kl = 0.1 + PC = 0.1 + \frac{A_{PV}}{A_{MP}} = 0.1 + \frac{A_C}{A_{MP}} = 0.1 + \frac{S_P \times \phi_C}{A_{MP}} \quad (II.5)$$

Donde:

$Pc \rightarrow$ Es la fracción de área sombreada por el cultivo (m^2).

$A_{MP} \rightarrow$ Es el área del marco de plantación (m^2).

$A_C \rightarrow$ Es el área de raíces activas (m^2), se aplica en los casos de cultivos que no tienen copa definida y se determina gráficamente en función del marco de plantación, la disposición de los emisores en relación con las plantas y el área humedecida por el emisor.

$A_{PV} \rightarrow$ Es el área de la proyección vertical de la copa del árbol medida a mediodía en el solsticio de verano (m^2).

Con relación a (A_{PV}), estudios realizados por Rodrigo Rodríguez (IICF /1990), sugieren la idea de dejar para el laboreo un espacio libre de 2.4 m sea cual fuere el marco de plantación, esto se puede lograr mediante la poda, no permitiendo que los árboles en su crecimiento

vegetativo cubran toda la superficie del terreno, conformándose un seto a lo largo de la hilera de plantas. Siendo así, es más conveniente estimar (A_c) en el caso de cultivos cítricos y frutales; dispuestos a distancias de siembras amplias y con superficie de follaje definida, como un rectángulo y no como un círculo como asumen DECROIX y otros autores:

$S_P \rightarrow$ Es la separación entre plantas de una misma hilera (m).

$\varnothing_c \rightarrow$ Diámetro de la copa del árbol (m).

De acuerdo con R. Rodríguez /1990 los diámetros de la copa de los distintos cultivares cítricos en plena adultez y bajo el principio anteriormente señalado se alcanzan en diferentes edades de la plantación, los mismos se ofrecen en la siguiente tabla.

Tabla 14: Diámetro de la copa para cítricos en plena adultez, R. Rodríguez /1990.

Cultivo	Marco de plantación (m × m)	Diámetro de la copa (m)	Edad a que lo alcanza	Observaciones
Naranja Valencia	5 × 3	2.6	4 a 6	Patrones Agrio <i>Macrophylla</i> <i>Volkameriana</i>
	6 × 4	3.6	6 a 8	
	8 × 4	5.6	8 a 10	
Limonero Frost Eureka	5 × 3	2.6	3 a 4	Patrones <i>Macrophylla</i> y <i>Volkameriana</i>
	6 × 4	3.6	4	
	8 × 4	5.6	5 a 6	
Pomelo	6 × 5	3.6	8 a 10	
	8 × 5	5.6	10	
	10 × 5	7.6	16	

Se deberá conocer el ancho que se dejará para el laboreo, este dato debe constar en la Tarea Técnica. Tocante al cultivo del plátano, no tiene sentido referirse al diámetro de la copa, ya que la misma definida, por lo que la denominación que se utiliza es la de “Área de raíces activas (A_c)”, y se define por el rectángulo que forman dos líneas paralelas a la hilera de plantas y que están a una distancia de ésta igual a la mitad de la distancia de camellón (entre hileras de la calle estrecha) para el marco de plantación recomendado.

Es común expresar las necesidades netas en unidades de volumen, multiplicando su valor por el área del marco de plantación. Cuando se trate de hidropónicos o cualquiera de sus variantes, es más razonable multiplicar por el área de sustrato por metro lineal de cantero (A_{ml}).

En el caso del diseño de sistemas de riego por aspersión la estimación de las necesidades netas se diferencia del diseño de los sistemas de Riego Localizado en que no intervienen los coeficientes de corrección por localización de riego, el coeficiente que tiene en cuenta la variabilidad climática ni el coeficiente de advección ($Kl \times Kvc \times Ka = 1$).

Con relación a (Kp) es válido aclarar que: la evaporación de la cubeta es un parámetro muy fácil de medir cuando la misma está instalada apropiadamente. En ausencia de precipitaciones, la cantidad de agua evaporada (mm/día), se corresponde con la disminución del nivel de agua en la cubeta. Su valor integra los efectos de los mismos factores climáticos que intervienen en la transpiración del cultivo: *la radiación, la humedad y temperatura del aire y la velocidad del viento*, sin embargo, algunos de estos factores tienen un comportamiento diferente, lo cual conlleva a diferencias entre las pérdidas de agua que se producen en la cubeta con relación a las que se producirían en el cultivo de referencia. A pesar de éstas, su utilización, ofrece resultados aceptables para periodos de 10 días o más, la práctica del riego indica calibrarlos a partir de la ETo obtenida a partir del método FAO Penman – Monteith, su relación con ETo se expresa mediante:

$$ET_o = E_{cubeta} \times K_p \quad (II.6)$$

El Evaporímetro de cubeta clase A es circular, se fabrican con un diámetro de 1.207 m y una profundidad de 0.25 m, se construyen de metal, preferiblemente de Acero Galvanizado (22 gauge). Es montado sobre una base de madera que lo separa de la superficie del suelo bien alisada a 0.15 m, el evaporímetro quedará instalado de forma horizontal y lleno de agua hasta una distancia de 5 a 7.5 cm por debajo del borde superior de la cubeta, esta agua debe ser cambiada semanalmente para eliminar la turbidez extrema. Las cubetas galvanizadas se pueden pintar anualmente con pintura de Aluminio y no son recomendables la utilización de cubiertas de vidrio sobre la cubeta para protegerlas de los animales. El lugar debe estar cubierto de pasto (20 m × 20 m) y abierto a la atmosfera para permitir la libre circulación del aire, preferiblemente en el centro de una extensión cultivada. Las lecturas deben realizarse diariamente, en la mañana y a la misma hora.

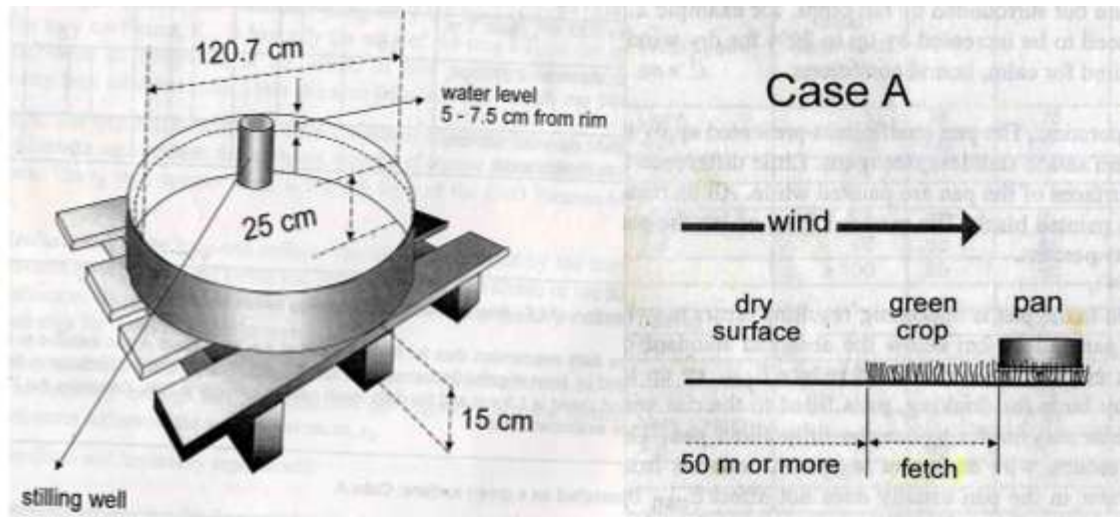


Figura 19: Representación del Evaporímetro clase A.

Los valores de (K_p) dependen del tipo de cubeta y de las características del entorno donde se encuentren ubicados, también dependen de la velocidad del viento y de la condiciones de humedad.

$$K_p = 0.108 - 0.0286 \times V_v + 0.0422 \times \ln(fetch) + 0.1434 \times \ln(HR_{med}) - 0.000631 \times [\ln(fetch)]^2 \times \ln(HR_{med}) \quad (II.7)$$

Donde:

$V_v \rightarrow$ Promedio diario de la velocidad del viento (m/s) medido a 2m de altura de la cubierta vegetal. Cuando no se tengan registros su valor puede ser asumido a partir de los datos de la tabla 6.

Tabla 15: Valores de (K_p) para diferentes entornos: Allen (1998).

V_v (m/s)	FETCH (m)	HR_{med} (%)		
		BAJA (< 40)	MEDIA (40 a 70)	ALTA (> 70)
Ligero (< 2)	1	0.55	0.65	0.75
	10	0.65	0.75	0.85
	100	0.70	0.80	0.85
	1000	0.75	0.85	0.85
Moderado (2 a 5)	1	0.50	0.60	0.65
	10	0.60	0.70	0.75
	100	0.65	0.75	0.80
	1000	0.70	0.80	0.80
Fuerte (5 a 8)	1	0.45	0.50	0.60
	10	0.55	0.60	0.65
	100	0.60	0.65	0.70
	1000	0.65	0.70	0.75
Muy fuerte (> 8)	1	0.40	0.45	0.50
	10	0.45	0.55	0.60
	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.55	0.60	0.65

Cálculo de las Necesidades Totales (N_t):

Cuando se diseñan sistemas de riego por aspersión este parámetro usualmente no se tiene en cuenta, en su lugar la práctica del diseño propone estimar la dosis de riego bruta como el cociente de dividir la capacidad de almacenamiento del suelo entre las posibles pérdidas de agua que se prevén lugar en el sistema y con este parámetro estimar la dosis frecuencia y duración del riego que es el objetivo principal del diseño agronómico.

Esto es debido probablemente a que los riesgos de afectaciones debidas a la salinidad son menos probables en los sistemas de riego por aspersión debido a las características que este presenta con relación a la aplicación de los volúmenes de agua de riego, de manera diferente a como ocurre en los sistemas de riego localizado, donde los volúmenes que se

aplican son menores y es mayor el riesgo de afectaciones por la salinidad. De esta forma para el cálculo de las necesidades totales de agua en los sistemas de riego localizado, se tendrán en cuenta los siguientes elementos:

1. Pérdida de agua por percolación: Las pérdidas de agua en la parcela en los RLAF son prácticamente las debidas a la percolación, las pérdidas por escorrentía solamente se presentan en casos de manejos de riego muy deficientes por lo que no se tendrán en cuenta.
2. Necesidades de lavado: Las necesidades de lavado son un sumando que hay que añadir a las N_n para mantener la salinidad del suelo a un nivel no perjudicial al cultivo.
3. Falta de uniformidad del riego: La falta de uniformidad del riego se debe a varias causas: Hidráulicas, constructivas, climáticas, de envejecimiento y obturación de los emisores, etc., las mismas provocan que los emisores arrojen caudales diferentes y por tanto los cultivos reciban dosis de riego desiguales, a efectos de diseño se establece la condición de que la parte de la parcela que menos agua reciba, se le entregue como promedio, cierta fracción de la dosis media, a esa fracción se le llama Coeficiente de Uniformidad y se representa por CU .

La dosis media se aumenta de forma que la fracción de la finca menos regada reciba la cantidad de agua necesaria para su desarrollo, el CU se puede utilizar para la evaluación de instalaciones en funcionamiento o para el diseño de nuevas instalaciones, en el diseño agronómico, es una condición que se impone, se puede fijar a voluntad, pero en su elección hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea su valor, más uniforme será el riego, menores serán las necesidades totales (NT), y el consumo de agua será menor, es decir que en la parte más regada de la parcela sobraré menos agua, pero en cambio la instalación será más cara, ya que para lograr que haya menos dispersión de caudales el régimen de presiones exige mayores diámetros de tuberías, laterales más cortos, mayores inversiones en reguladores de presión, etc.

La elección del CU es una cuestión económica, se debe comparar el costo y la posibilidad del mayor consumo de agua en la inversión inicial. Para Cuba $CU \geq 90 \%$, siguiendo la sugerencia planteada por la FAO, así, las (N_t) se obtienen por medio de:

$$N_t = \frac{N_n}{CU(1-K)} \quad (II.8)$$

Donde:

$K = 1$ - Eficiencia de aplicación (si existe riesgo de pérdidas por percolación).

$K = LR$ (en el caso de necesidades de lavado de sales).

Para la aplicación práctica de esta fórmula se trabaja con el mayor valor de K , es decir, si las pérdidas por percolación son mayores que las necesidades de lavado, estas pérdidas provocarían un lavado superior al necesario, con lo que el nivel de salinidad se mantendrá por debajo del mínimo. Si, por el contrario, las pérdidas son menores que las necesidades de lavado, habrá que provocar voluntariamente una mayor percolación para evitar la salinización del suelo. El cálculo de las necesidades de lavado (LR) es bastante complicado, además puede ser conveniente no cargar al riego todas las necesidades de lavado, permitiendo que la lluvia realice parte de esa mejora. Su estudio detallado no forma parte de esta monografía. Un método de cálculo aproximado establece:

$$LR = \frac{CE_{ar}}{2 \times CE_{es}} \quad (II.9)$$

Donde:

$CE_{ar} \rightarrow$ Es la conductividad eléctrica del agua de riego (dS/m).

$CE_{es} \rightarrow$ Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (dS/m), valor que se impone como objetivo a conseguir con el lavado y que depende de los cultivos a beneficiar.

La Tabla16 ofrece el comportamiento del potencial productivo en (%) de algunos cultivos a partir de CE_{es} .

Tabla 16: Variación de la productividad en (%) según CE(es) en (dS/m), Pizarro (2000).

Cultivos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Aguacate	100	90	70	0						
Fríjoles	100	81	62	43	25	6	0			
Toronja	100	97	81	65	48	32	16	0		
Limón	100	91	75	0						
Cebolla	100	87	71	55	39	23	6	0		
Arroz	100	100	100	88	76	63	51	39	27	15
Melocotón	100	94	73	52	31	10	0			
Piña	100	71	34	0						
Rosas	100	74	36	0						
Coliflor	100	100	93	85	0					
Calabaza	100	98	88	79	69	59	50	40	30	20
Pepino	100	100	94	81	68	55	42	29	16	3
Pimienta	100	93	79	65	51	37	23	8	0	
Naranja	100	95	79	63	48	32	16	0		
Patata	100	96	84	72	60	48	36	24	12	
Caña de azúcar	100	98	92	86	81	75	69	63	57	51
Boniato	100	95	84	73	62	51	46	29	18	7
Tomate	100	100	95	85	75	65	55	46	36	26
Soya	100	100	100	100	100	100	80	60	40	20
Algodón	100	100	100	100	100	100	100	98	93	88

II.2.- Procedimiento para el diseño agronómico.

RIEGO POR ASPERSIÓN CONVENCIONAL (Martín-Benito, 2005)

Procedimiento para el Diseño agronómico: Para diseñar agronómicamente el sistema de riego por aspersión convencional es necesario el análisis riguroso de los elementos que componen la relación Agua – Suelo – Planta – Clima. El estudio de estos elementos permitirá estimar adecuadamente las necesidades hídricas del cultivo a beneficiar, así como

la dosis, frecuencia y duración del riego a emplear para satisfacer estas necesidades. En este sentido sobre la fuente de abasto es necesario conocer fundamentalmente las disponibilidades de las mismas para compararlas con las necesidades anuales del sistema de riego y los datos sobre la calidad y procedencia de las aguas a utilizar en el riego, ya que estos permiten entre otros escoger las características de los agregados de riego y las perspectivas de fertirrigación. Con relación a los suelos, interesa conocer todos los relacionados con las propiedades físico – químicas de los mismos (velocidad de infiltración básica, contenido de sales de la solución del suelo, textura y otros). Relacionado con el cultivo a beneficiar, es necesario conocer su tolerancia a la salinidad y resistencia a la inundación, marco de plantación, coeficiente bioclimático, profundidad radicular y otros que se reconocen dentro del procedimiento de diseño. Acerca de las incidencias climáticas es necesario conocer fundamentalmente los valores medios mensuales de evaporación 25 %P y precipitación 75 %P, para una serie de al menos 40 años. Además de la dirección y velocidad de los vientos predominantes, altitud y otros.

1. Necesidades Hídricas (N_H [mm/d])

$$N_H = E_{V25\%P} \times K_P \times K_C \quad (\text{II.10})$$

Donde:

$N_H \rightarrow$ Necesidades hídricas diarias el cultivo a beneficiar (mm/d).

$E_{V25\%P} \rightarrow$ Evaporación de la cubeta para la probabilidad de diseño (mm).

$K_P \rightarrow$ Coeficiente de corrección de la cubeta.

$K_C \rightarrow$ Coeficiente bioclimático del cultivo a beneficiar.

Lujan, propone la siguiente expresión como alternativa para el cálculo de la N_H .

$$N_H = 0.034 \times \frac{N_{MP}^{1.09}}{D_N^{0.09}} \quad (\text{II.11})$$

$N_{MP} \rightarrow$ Necesidades netas del cultivo a beneficiar en el mes de máxima demanda (mm/mes).

$D_N \rightarrow$ Dosis de riego neta (mm).

2. Dosis de riego neta (D_N [mm/d])

$$D_N = 10 \times h \times \alpha \times (CC - LP) \quad (\text{II.12})$$

Donde:

$D_N \rightarrow$ Dosis de riego neta (mm).

$h \rightarrow$ Profundidad del perfil del suelo a humedecer (m).

α → Densidad aparente del perfil del suelo a humedecer.

CC → Capacidad de campo del perfil del suelo a humedecer (%P_{ss}).

LP → Limite productivo o descenso tolerable de humedad (%CC).

Selléz y Ferreyra, plantean que la dosis o lámina de riego neta, corresponde a la cantidad de agua necesaria para suplir el déficit de humedad del suelo, producto de la extracción de agua por parte del cultivo. Su valor se obtiene al aplicar el valor de umbral de riego al total de agua que puede retener un suelo en el rango explorado por la zona de raíces del cultivo. El valor de (UR%) depende del cultivo y de la evapotranspiración potencial del área de estudio. Para cuantificar la lámina de riego neta estos autores proponen la siguiente expresión.

$$L_N = \frac{UR\%}{100} \times H_R \times H \times \left(\frac{1-P}{100} \right) \quad (\text{II.13})$$

Donde:

L_N → Lamina de riego neta (mm).

UR% → Umbral de riego.

H_R → Retención de humedad media en el terreno (mm/m).

H → Profundidad de raíces del cultivo (m).

P → Porcentaje de piedras del perfil del suelo.

Lujan1, también coincide con Selléz y Ferreyra2, pero propone la siguiente expresión como alternativa para estimar DN.

$$D_N = 10 \times h \times \alpha \times (CC - PM) \times LP \quad (\text{II.14})$$

Donde:

D_N → Dosis de riego neta (mm).

h → Profundidad del perfil del suelo a humedecer (m).

α → Densidad aparente del perfil del suelo a humedecer.

CC → Capacidad de campo del perfil del suelo a humedecer (%P_{ss}).

PM → Coeficiente de marchitamiento del cultivo a beneficiar.

LP → Limite productivo o descenso tolerable de humedad (%CC).

3. Dosis de riego bruta (D_b [mm/d])

$$D_B = \frac{D_N}{ER} \quad (\text{II.15})$$

Donde:

$D_B \rightarrow$ Dosis bruta o dosis total (mm).

$D_N \rightarrow$ Dosis de riego neta (mm).

$ER \rightarrow$ Eficiencia de riego (tx1).

La dosis de riego bruta incluye la eficiencia de aplicación. En los sistemas de riego por aspersión estacionario la eficiencia de aplicación es del orden del 70 al 80 % normalmente se considera como 75 %, su valor generalmente se asume y depende fundamentalmente de la velocidad del viento y la magnitud de la dosis neta que se aplique. En términos cuantitativos, viene dada por el cociente entre el volumen de agua que se aplica directamente a la parcela y el volumen total de agua que se entrega para el sistema de riego.

4. FRECUENCIA DE RIEGO (I_R [días])

$$I_R = \frac{D_N}{ET_C} \quad (II.16)$$

Donde:

$I_R \rightarrow$ Intervalo entre riegos (días).

$D_N \rightarrow$ Dosis de riego neta (mm).

$ET_C \rightarrow$ Evapotranspiración diaria del cultivo de referencia (mm).

5. Tasa de precipitación del aspersor (I_{AP} [mm/h])

$$I_{AP} = \frac{3600 \times Q_{ASP}}{A_{HUM}} \times EA_P = \frac{3600 \times Q_{ASP}}{E_{ASP} \times E_{LAT}} \times EA_P \quad (II.17)$$

Donde:

$I_{AP} \rightarrow$ Intensidad de aplicación del aspersor (mm/h).

$Q_{ASP} \rightarrow$ Caudal de funcionamiento del aspersor (l/s).

$A_{HUM} \rightarrow$ Área que humedece un aspersor (m²).

$EA_P \rightarrow$ Eficiencia de aplicación del aspersor [valor que se asume (tx1)].

$E_{ASP} \rightarrow$ Espaciamiento entre aspersores de un mismo lateral (m).

$E_{LAT} \rightarrow$ Espaciamiento entre laterales de una misma distribuidora (m).

Para obtener la intensidad de aplicación del aspersor es necesario hacer dos distinciones según que los aspersores trabajen de forma aislada o que trabajen dispuestos de forma tal que exista al menos un solape del 30% entre las áreas de humedecimiento que estos producen, para este último caso hay que tener en cuenta la disposición en planta de los

agregados de riego y de cualquier forma para todos los casos se debe cumplir que la velocidad de infiltración estabilizada del suelo debe ser menor que el valor de la Intensidad de Aplicación calculado, pues esto garantiza que no existen pérdidas por percolación profunda o escorrentía superficial. En este sentido se han propuesto varios criterios, los cuales dependen fundamentalmente de la disposición en planta de la red de riego y de la velocidad del viento, García y Fontova³, proponen las siguientes expresiones:

$$E_{ASP} = R_{ALC} \times k \quad (II.18)$$

$$E_{LAT} = 1.73 \times R_{ALC} \times k \quad \text{Disposición rectangular} \quad (II.19)$$

$$E_{ASP} = 1.5 \times R_{ALC} \times k \quad (II.20)$$

$$E_{LAT} = \sqrt{3} \times R_{ALC} \times k \quad \text{Disposición triangular} \quad (II.21)$$

$$E_{ASP} = E_{LAT} = R_{ALC} \times \sqrt{2k} \quad \text{Disposición cuadrada} \quad (II.22)$$

$$k = 0.34 \times e^{-0.35 \times V_V} + 0.66 \quad (II.23)$$

Donde:

R_{ALC} → Radio de alcance del aspersor (m).

k → Coeficiente en función de la velocidad del viento.

V_V → Velocidad de los vientos predominantes (m/s).

Con relación a la velocidad de infiltración básica o estabilizada, es conveniente aclarar que la misma, corresponde al valor instantáneo de velocidad de infiltración, cuando su variación en el tiempo, entre dos periodos de medición consecutivos no supera un 10 % de su valor. La velocidad de infiltración debe ser medida en la parcela y es cuando se obtienen los resultados más rigurosos o bien se puede estimar a partir de tablas para distintas condiciones de texturas del suelo, en cuyo caso es necesario escoger los valores adecuadamente según se adapten a las condiciones específicas de que se trate.

6. Tiempo de aplicación de la dosis de riego (T_{AP} [horas])

$$T_{AP} = \frac{D_B}{I_{AP}} \quad (II.24)$$

Donde:

T_{AP} → Tiempo de aplicación de la dosis de riego (horas).

D_B → Dosis bruta o dosis total (mm).

I_{AP} → Intensidad de aplicación del aspersor (mm/h).

7. Tiempo de riego (T_R [horas])

$$T_R = T_{AP} + T_C \quad (\text{II.25})$$

Donde:

$T_R \rightarrow$ Tiempo de riego (horas).

$T_{AP} \rightarrow$ Tiempo de aplicación de la dosis de riego (horas).

$T_C \rightarrow$ Tiempo de cambio (horas).

En los casos de diseño de sistemas de riego por aspersión convencional fijo o permanente el tiempo de cambio es cero, de esta forma ambos tiempos coinciden.

8. Dosis total o definitiva (Dt (mm))

$$Dt = T_{AP} \times I_{ap} \quad (\text{II.26})$$

$D_t \rightarrow$ Dosis total definitiva (mm)

$T_{AP} \rightarrow$ Tiempo de aplicación de la dosis de riego (horas).

$I_{AP} \rightarrow$ Intensidad de aplicación del aspersor (mm/h).

Diseño agronómico de riego por Pivote Central:

Calculo de la longitud del pivote:

$$L = \sqrt{A} \quad (\text{II.27})$$

$L \rightarrow$ Longitud del pivote (m).

$A \rightarrow$ Arrea de la parcela (m^2).

Radio del pivote:

$$R = \frac{L}{2} \quad (\text{II.28})$$

$R \rightarrow$ Radio del pivote (m).

$L \rightarrow$ Longitud del pivote (m).

Número de torres:

$$\#_{torres} = \frac{R}{Sep/torr} \quad (\text{II.29})$$

$\#_{torres} \rightarrow$ Número de torres (torres).

$Sep/torr \rightarrow$ Separación entre torre (m).

Radio hasta la última torre:

$$R_{ul} = \#_{torres} * sep/torr \quad (\text{II.30})$$

$R_{ul} \rightarrow$ Radio hasta la última torre(m).

#torres → Número de torres (torres).

Sep/torr → Separación entre torre (m).

Radio de la superficie regada:

$$R_{SR} = R_{ul} + dist.hasta asp \quad (II.31)$$

R_{SR} → Radio de la superficie regada (m).

R_{ul} → Radio hasta la última torre(m).

Área de la superficie regada:

$$A_{SR} = \pi \times R_{SR}^2 \quad (II.32)$$

A_{SR} → Área de la superficie regada (m²).

R_{SR} → Radio de la superficie regada (m).

Necesidades hídricas:

$$N_H = E_{V25\%p} \times K_P \times K_C \quad (II.33)$$

N_H → Necesidades hídricas diarias el cultivo a beneficiar (mm/d).

$E_{V25\%P}$ → Evaporación de la cubeta para la probabilidad de diseño (mm).

K_P → Coeficiente de corrección de la cubeta.

K_C → Coeficiente bioclimático del cultivo a beneficiar.

Caudal del pivote:

Éste debe calcularse para el mes de máxima necesidades del cultivo de la alternativa de mayores exigencias hídricas:

$$Q_p = \frac{N_H \times A_{SR} \times 10000}{E_{fap} \times 3600} \quad (II.34)$$

Q_p → Caudal del pivote (l/s).

N_H → Necesidades hídricas diarias el cultivo a beneficiar (mm/d).

A_{SR} → Área de la superficie regada (ha).

E_{fap} → Eficiencia de aplicación (decimal).

Tod → Tiempo de operación diaria (h).

Tiempo mínimo para que el pivote complete una vuelta:

El tiempo necesario para que el lateral complete una vuelta depende de la velocidad de desplazamiento de la última torre y de la longitud que ha de recorrer. La velocidad de avance de la última torre viene figada por el fabricante según las características del desmultiplicador en el mecanismo de transmisión y suele ser del orden de 1,8 m/min.

$$T_{mín} = \frac{2\pi \times R_{ul}}{V_{máx}} \quad (II.35)$$

$T_{mín} \rightarrow$ Tiempo mínimo para que el pivote complete una vuelta (h).

$R_{ul} \rightarrow$ Radio hasta la última torre(m).

$V_{máx} \rightarrow$ Velocidad máxima que alcanza el pivote (m/min).

Tiempo máximo para que el pivote complete una vuelta:

$$T_{máx} = \frac{2\pi \times R_{UT}}{V_{mín}} \quad (II.36)$$

$T_{máx} \rightarrow$ Tiempo máximo para que el pivote complete una vuelta (h).

$R_{ul} \rightarrow$ Radio hasta la última torre(m).

$V_{mín} \rightarrow$ Velocidad mínima que alcanza el pivote (m/min).

Tiempo máximo que utiliza el pivote en mojar un punto:

$$T_M = 211.818 \times P_M^{-1.51494} \quad (II.37)$$

$T_M \rightarrow$ Tiempo máximo que utiliza el pivote en mojar un punto (min).

$P_M \rightarrow$ Pluviometría máxima (mm/h).

Pluviometría máxima:

$$P_M = \frac{28800}{\pi} \times \frac{Q_p}{A_M \times R_{SR}} \quad (II.38)$$

$P_M \rightarrow$ Pluviometría máxima (mm/h).

$Q_p \rightarrow$ Caudal del pivote (l/s).

$R_{SR} \rightarrow$ Radio de la superficie regada (m).

$A_M \rightarrow$ Anchura mojada (m).

Anchura mojada

$$A_M = 2 \times R_{asp} \quad (II.39)$$

$A_M \rightarrow$ Anchura mojada (m).

$R_{asp} \rightarrow$ Radio del aspersor (m).

Velocidad mínima

$$V_{mín} = \frac{A_M}{T_M} \quad (II.40)$$

$V_{mín} \rightarrow$ Velocidad mínima (m/min).

$A_M \rightarrow$ Anchura mojada (m).

$T_M \rightarrow$ Tiempo máximo que utiliza el pivote en mojar un punto (min).

Dosis bruta máxima:

$$D_{B_{m\acute{a}x}} = 0.36 \times \frac{Q_P \times T_{m\acute{a}x}}{A_{SR}} \quad (\text{II.41})$$

$D_{B_{m\acute{a}x}} \rightarrow$ Dosis bruta máxima (mm).

$Q_P \rightarrow$ Caudal del pivote (l/s).

$T_{m\acute{a}x} \rightarrow$ Tiempo máximo para que el pivote complete una vuelta (h).

$A_{SR} \rightarrow$ Área de la superficie regada (ha).

Dosis bruta mínima:

$$D_{B_{m\acute{i}n}} = 0.36 \times \frac{Q_P \times T_{m\acute{i}n}}{A_{SR}} \quad (\text{II.42})$$

$D_{B_{m\acute{i}n}} \rightarrow$ Dosis bruta mínima (mm)

$Q_P \rightarrow$ Caudal del pivote (l/s).

$T_{m\acute{i}n} \rightarrow$ Tiempo mínimo para que el pivote complete una vuelta (h).

$A_{SR} \rightarrow$ Área de la superficie regada (ha).

Dosis neta máxima:

$$D_{N_{m\acute{a}x}} = D_{B_{m\acute{a}x}} \times E_{fr} \quad (\text{II.43})$$

$D_{N_{m\acute{a}x}} \rightarrow$ Dosis neta máxima (mm).

$E_{fr} \rightarrow$ Eficiencia de riego.

$D_{B_{m\acute{a}x}} \rightarrow$ Dosis bruta máxima (mm).

Dosis neta mínima:

$$D_{N_{m\acute{i}n}} = D_{B_{m\acute{i}n}} \times E_{fr} \quad (\text{II.44})$$

$D_{N_{m\acute{i}n}} \rightarrow$ Dosis neta mínima (mm).

$D_{B_{m\acute{i}n}} \rightarrow$ Dosis bruta mínima (mm).

$E_{fr} \rightarrow$ Eficiencia de riego (decimal).

Intervalo de riego máximo:

$$I_{R_{m\acute{a}x}} = \frac{D_{N_{m\acute{a}x}}}{N_H} \quad (\text{II.45})$$

$I_{R_{m\acute{a}x}} \rightarrow$ Intervalo de riego máximo (d).

$D_{N_{m\acute{a}x}} \rightarrow$ Dosis neta máxima (mm).

$N_H \rightarrow$ Necesidades hídricas diarias el cultivo a beneficiar (mm/d).

Intervalo de riego mínimo:

$$I_{R_{mín}} = \frac{D_{N_{mín}}}{N_H} \quad (II.46)$$

$I_{R_{mín}}$ → Intervalo de riego mínimo (d).

$D_{N_{mín}}$ → Dosis neta mínima (mm).

N_H → Necesidades hídricas diarias el cultivo a beneficiar (mm/d).

Dosis de riego neta real:

$$D_{R_{NR}} = I_{R_R} \times N_H \quad (II.47)$$

$D_{R_{NR}}$ → Dosis de riego neta real (mm).

I_{R_R} → Intervalo de riego real (d).

N_H → Necesidades hídricas diarias el cultivo a beneficiar (mm/d).

Dosis bruta real:

$$D_{B_R} = \frac{D_{R_{NR}}}{E_{f_R}} \quad (II.48)$$

D_{B_R} → Dosis bruta real (mm).

$D_{R_{NR}}$ → Dosis de riego neta real (mm).

E_{f_R} → Eficiencia de riego (decimal).

Tiempo de riego real:

$$T_{R_R} = \frac{D_{B_R} \times A_{SR}}{0.36 \times Q_P} \quad (II.49)$$

T_{R_R} → Tiempo de riego real (h).

D_{B_R} → Dosis bruta real (mm).

Q_P → Caudal del pivote (l/s).

A_{SR} → Área de la superficie regada (ha).

Comprobar que:

$$D_{N_{RR}} \leq CA \quad T_{mín} < T_{R_R} < T_{máx}$$

$$CA = CA_{dado} \times P_{Rad} \times AU \quad (II.50)$$

CA → Capacidad de almacenamiento (mm).

P_{Rad} → Profundidad radicular (cm).

AU → Porcentaje de agua útil (decimal).

Diseño de riego por Enrolladores:

Dosis Neta:

$$D_N = CA \times P_{rad} \times DTH \quad (II.51)$$

$D_N \rightarrow$ Dosis neta (mm).

$CA \rightarrow$ Capacidad de almacenamiento (mm).

$P_{Rad} \rightarrow$ Profundidad radicular (cm).

$DTH \rightarrow$ Descenso tolerable de humedad.

Dosis Bruta:

$$D_B = \frac{D_N}{Ef_{ap}} \quad (II.52)$$

$D_B \rightarrow$ Dosis bruta (mm).

$D_N \rightarrow$ Dosis neta (mm).

$Ef_{ap} \rightarrow$ Eficiencia de aplicación (decimal).

Necesidades hídricas:

$$N_H = E_{V_{25\%p}} \times K_p \times K_c \quad (II.53)$$

$N_H \rightarrow$ Necesidades hídricas (mm/d):

$E_{V_{25\%P}} \rightarrow$ Evaporación de la cubeta para la probabilidad de diseño (mm).

$K_P \rightarrow$ Coeficiente de corrección de la cubeta.

$K_C \rightarrow$ Coeficiente bioclimático del cultivo a beneficiar.

Intervalo de riego máximo:

$$I_{R_{máx}} = \frac{D_N}{N_H} \quad (II.54)$$

$I_{R_{máx}} \rightarrow$ Intervalo de riego máximo (d).

$D_N \rightarrow$ Dosis neta (mm).

$N_H \rightarrow$ Necesidades hídricas (mm/d):

Dosis neta real:

$$D_{N_R} = I_R * N_H \quad (II.55)$$

$D_{N_R} \rightarrow$ Dosis neta real (mm).

$I_R \rightarrow$ Intervalo de riego(d).

$N_H \rightarrow$ Necesidades hídricas (mm/d):

Dosis bruta real:

$$D_{BR} = \frac{D_{NR}}{E_{fap}} \quad (II.56)$$

D_{BR} → Dosis bruta real (mm).

D_{NR} → Dosis neta real (mm).

E_{fap} → Eficiencia de aplicación (decimal).

Caudal medio de bombeo:

$$Q = \frac{N_H \times A \times 10000}{E_{fap} \times T_{od} \times 3600} \quad (II.57)$$

Q → Caudal medio de bombeo (l/s).

N_H → Necesidades hídricas (mm/d).

A → Área de la parcela (ha).

E_{fap} → Eficiencia de aplicación (decimal).

T_{od} → Tiempo de operación diaria (h).

Tras la obtención del caudal se procede a elegir el aspersor conveniente para el sistema de riego mediante el catalogo que se encuentra en (Martín-Benito, 2005)

Intensidad de aplicación o pluviometría del aspersor:

$$I_{ap} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \times (90\% R_{asp})^2 \times \frac{\pi}{360^\circ}} \quad (II.58)$$

I_{ap} → Intensidad de aplicación o pluviometría del aspersor (mm/d).

Q → Caudal medio de bombeo (l/h).

R_{asp} → Radio de alcance del aspersor (m).

Separación entre bandas de riego:

Espaciamiento entre bandas:

$$E = 2 \times R_{asp} \times \% \phi_{Moj} \quad (II.59)$$

E → Espaciamiento entre bandas (m).

R_{asp} → Radio de alcance del aspersor (m).

$\% \phi_{moj}$ → % diámetro mojado (decimal).

Número de bandas:

$$\#_{band} = \frac{L}{E} \quad (II.60)$$

$\#_{band}$ = Número de bandas (bandas)

E → Espaciamiento entre bandas (m).

L → longitud de la manguera (m)

Ancho de la banda:

$$a_b = \frac{L}{\#_{band}} \quad (\text{II.61})$$

a_b → Ancho de banda (m).

L → longitud del catálogo (m).

$\#_{band}$ = Número de bandas (bandas)

Asumiendo el número de bandas entero (superior e inferior), calcular el ancho de bandas y % de diámetro mojado.

Espaciamiento (% de diámetro mojado):

$$E = 2 \times R_{asp} \times \% \phi_{Moj} \quad (\text{II.62})$$

R_{asp} → Radio de alcance del aspersor (m).

$$\% \phi_{moj} = \frac{a_b}{2 \times R_{asp}} \quad (\text{II.63})$$

$\% \phi_{moj}$ → % diámetro mojado (%).

a_b → Ancho de banda (m).

R_{asp} → Radio de alcance del aspersor (m).

Comprobar que $\% \phi_{moj}$ se encuentra se encuentre en el rango asumido anteriormente a través de la Tabla 9.

Velocidad de avance por aspersor:

$$V_{av} = \frac{Q}{D_{BR} \times E} \quad (\text{II.64})$$

V_{av} → Velocidad de avance (m/h)

D_{BR} → Dosis bruta real (mm).

Q → Caudal medio de bombeo (l/h).

E → Espaciamiento entre bandas (m).

Tiempo sin avance al inicio de la parcela:

$$T_i = \frac{2}{3} \times \frac{\phi}{360^\circ} \times \frac{R_{asp}}{V_{av}} \quad (\text{II.65})$$

ϕ → Ángulo del sector regado (°).

T_i → Tiempo sin avance al inicio de la parcela (h).

$V_{av} \rightarrow$ Velocidad de avance (m/h)

$R_{asp} \rightarrow$ Radio de alcance del aspersor (m).

Tiempo sin avance al final de la parcela:

$$T_f = \frac{2}{3} \times \left(1 - \frac{\phi}{360^\circ}\right) \times \frac{R}{V_{av}} \quad (\text{II.66})$$

$\phi \rightarrow$ Ángulo del sector regado ($^\circ$).

$T_f \rightarrow$ Tiempo sin avance al final de la parcela (h).

$V_{av} \rightarrow$ Velocidad de avance (m/h)

$R_{asp} \rightarrow$ Radio de alcance del aspersor (m).

Longitud de la manguera:

$$L_{mang} = \frac{a_p}{2} - D_{ip} \quad (\text{II.67})$$

$L_{mang} \rightarrow$ Longitud de la manguera (m).

$a_p \rightarrow$ Ancho de la parcela (m).

$D_{ip} \rightarrow$ Diámetro al inicio de la parcela (m).

Diámetro al inicio de la parcela:

$$D_i = \frac{2}{3} \times R_{asp} \quad (\text{II.68})$$

$D_{ip} \rightarrow$ Diámetro al inicio de la parcela (m).

$R_{asp} \rightarrow$ Radio de alcance del aspersor (m).

Tiempo de avance:

$$T_{AV} = \frac{L_{mang}}{V_{AV}} \quad (\text{II.69})$$

$T_{AV} \rightarrow$ Tiempo de avance (h).

$L_{mang} \rightarrow$ Longitud de la manguera (m).

$V_{av} \rightarrow$ Velocidad de avance (m/h).

Riego localizado:

Procedimiento para el Diseño agronómico:

La estimación de las Necesidades netas del cultivo en el período de máxima demanda se realiza según lo referido en el epígrafe II.1 y conjuntamente con lo establecido para la estimación de las Necesidades totales de agua, constituyen los dos primeros pasos para comenzar el diseño agronómico de un sistema de riego localizado. Ambos son comunes para las dos técnicas que más presencia tienen en las Empresas Agrícolas del país: la técnica de riego por Goteo y la técnica de riego por Microaspersión. Las primeras se distinguen porque utilizan el suelo para aplicar el agua a las plantas y la Microaspersión, por el contrario, aplica el agua a los cultivos a través del aire, esta significativa diferencia conlleva a que la dosis, frecuencia y duración de los riegos se determine con procedimientos diferentes.

Calculo de las necesidades netas hídricas puntas:

$$N_H = E_{V_{10\%p}} \times K_p \times K_b \times K_l \times K_a \quad (\text{II.70})$$

N_H → Necesidades netas hídricas puntas (mm/d).

K_P → Coeficiente de corrección de la cubeta.

K_b → Coeficiente bioclimático del cultivo a beneficiar.

K_l → Coeficiente debido a la localización.

K_a → Coeficiente de advección.

Calculo del coeficiente debido a la localización:

$$K_l = P_c + 0.1 = \frac{A_c}{A_{mp}} + 0.1 \quad (\text{II.71})$$

P_c → Fracción de área sombreada por el cultivo.

A_c → Área de la proyección vertical de la copa del árbol (m²).

A_{mp} → Área del marco de plantación (m²).

Calculo del área de la proyección vertical de la copa del árbol:

$$A_c = S_p \times D_c \quad (\text{II.72})$$

S_p → Separación entre plantas de una misma hilera(m).

D_c → Diámetro de la copa del árbol(m).

Calculo de las Necesidades Totales.

$$N_t = \frac{N_H}{C_u \times (1-K)} \quad (II.73)$$

$N_t \rightarrow$ Necesidades Totales (mm/d).

$N_H \rightarrow$ Necesidades netas hídricas puntas (mm/d).

$$K = 1 - E_{fap} \rightarrow (\text{en el caso de las pérdidas}). \quad (II.74)$$

$$K = L_R \rightarrow (\text{en el caso del lavado}).$$

$E_{fap} \rightarrow$ Eficiencia de aplicación.

$L_R \rightarrow$ Necesidades de lavado

$C_u \rightarrow$ Coeficiente de uniformidad.

Calculo de las Necesidades de lavado:

$$L_R = \frac{CE_{ar}}{2 \times CE_{es}} \quad (II.75)$$

$CE_{ar} \rightarrow$ Conductividad eléctrica del agua de riego.

$CE_{es} \rightarrow$ Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo.

Se escoge el mayor valor de K.

Calculo del Porciento que representa el Ah_R respecto al A_c .

$$PH_R = \left(\frac{Ah_R}{A_c} \right) \times 100 \quad (II.76)$$

$PH_R \rightarrow$ Porciento que representa el Ah_R respecto al A_c (%).

$Ah_R \rightarrow$ Área de humedecimiento real (m^2).

$A_c \rightarrow$ Área de la proyección vertical de la copa del árbol (m^2).

Calculo del área de humedecimiento real:

$$Ah_R = A_e \times N_e \quad (II.77)$$

$Ah_R \rightarrow$ Área de humedecimiento real (m^2).

$A_e \rightarrow$ Área mojada por un emisor (m^2).

$N_e \rightarrow$ Numero de emisores que humedecen una misma planta.

Determinación del área mojada por un emisor:

$$A_e = \pi \times (R_e \times 1.1)^2 \quad (II.78)$$

$A_e \rightarrow$ Área mojada por un emisor (m^2).

$R_e \rightarrow$ Radio del emisor (m)

En estos casos la superficie humedecida se determina gráficamente, representando a escala en un papel milimetrado, la distancia de siembra de la hilera planta y la manguera lateral de riego con sus emisores separados equidistantemente a la distancia prevista. Una vez ubicados los círculos que representan la periferia del bulbo humedecido por el emisor a lo largo de toda la hilera de plantas (todo el lateral), se determinan el área humedecida correspondiente a cada planta. Se tomará como resultado final el promedio de los patrones más representativos de la distribución de humedad. El gráfico que le sigue muestra un ejemplo real.

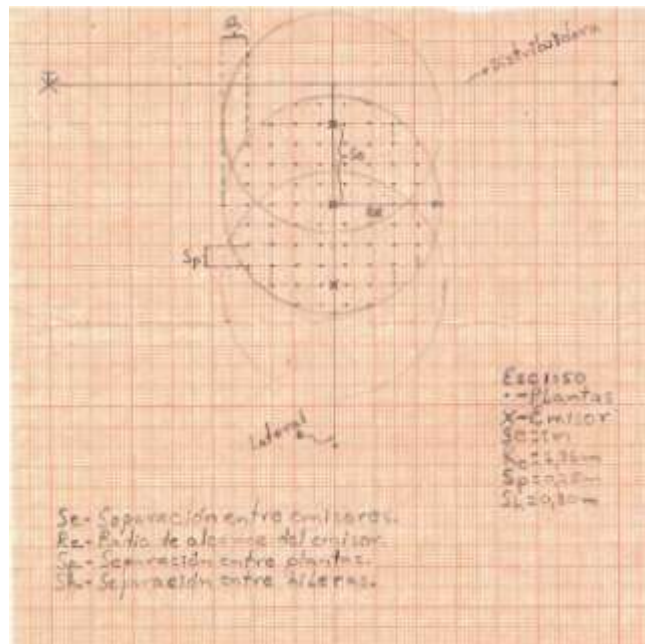


Figura 20: Determinación de AHR por el método gráfico, Quesada (2009).

El área de raíces activas de la planta también se puede determinar gráficamente en el caso de cultivos como el Plátano que no tiene copa definida, en el caso de plantas con distancias de siembra amplias como los cítricos y la mayoría de los frutales su determinación se puede realizar de forma analítica, de la misma manera que se realizó para el cálculo de coeficiente de localización del riego (K_l) del epígrafe II.1 y en el caso de cultivos con alta densidad de plantación como la mayoría de la Hortalizas y los Vegetales, su determinación no tiene una incidencia significativa en el diseño ya que los porcentajes de humedecimiento reales suelen ser del 100%.

En cualquiera de los casos la restricción para el diseño agronómico establece que ($PH_{real} \geq PH_{mínimo}$), para favorecer esencialmente, el anclaje de las plantas, mayor

asimilación de los nutrientes debidos al fertirriego y una mayor facilidad para el manejo de sales.

Calculo de la Capacidad de Almacenamiento:

$$M_N = 10 \times h \times \alpha \times (CC - LP) \quad (II.79)$$

M_N → Capacidad de almacenamiento (mm).

h → Profundidad del perfil del suelo a humedecer (m).

α → Densidad aparente del perfil del suelo a humedecer.

CC → Capacidad de campo del perfil del suelo a humedecer (% P_{ss}).

LP → Limite productivo o descenso tolerable de humedad (% CC).

Intervalo de riego:

$$I_R = \frac{M_N}{N_H} \quad (II.80)$$

I_R → Intervalo de riego (días).

M_N → Capacidad de almacenamiento (mm).

N_H → Necesidades netas hídricas puntas (mm/d).

Tiempo de riego:

$$T_R = \frac{N_{ds} \times N_t \times I_R}{N_{dr} \times Q_p} \quad (II.81)$$

T_R → Tiempo de riego (h).

N_{ds} → Número de días de la semana.

N_t → Necesidades totales (L).

I_R → Intervalo de riego (días).

N_{dr} → Número de días de riego.

Q_p → Caudal instalado por planta (L/h).

Gasto instalado por planta:

El caudal instalado por planta se calcula en dependencia de como sea la disposición de los emisores con respecto a la hilera de plantas. Cuando se trata de emisores dispuestos para crear una **franja de humedecimiento continuo**, es muy utilizada la expresión:

$$Q_P = Q_e \times \frac{A_{Hr}}{A_e} \quad (II.82)$$

Donde:

$Q_e \rightarrow$ Es el caudal que aplica el emisor (L/h) a la presión de trabajo y que garantiza humedecer la superficie (A_e).

$A_e \rightarrow$ Es la superficie que humedece el emisor (m^2).

Cuando se trata de un **número entero de emisores por planta**, la práctica recomienda:

$$Q_P = Q_e \times N_e \quad (II.83)$$

Donde:

$N_e \rightarrow$ Es el número de emisores que humedece una misma planta (u).

Cuando se trata de una disposición de emisores en **franjas de humedecimiento continuo en líneas pareadas** alrededor de un lateral central se puede utilizar la expresión siguiente:

$$Q_P = \frac{Q_e \times S_p}{2 \times S_e} \quad (II.84)$$

Donde:

$S_e \rightarrow$ Es la separación entre emisores a lo largo del lateral (m).

$S_p \rightarrow$ Es la separación entre plantas de una misma hilera (m).

Dosis total definitiva:

$$D_T = \frac{T_{Rajust} \times N_{dr} \times Q_P}{N_{ds} \times I_{Rajust}} \quad (II.85)$$

$D_T \rightarrow$ Dosis total definitiva (mm/d).

$T_{Rajust} \rightarrow$ Tiempo de riego ajustado (h).

$I_R \rightarrow$ Intervalo de riego (días).

$N_{dr} \rightarrow$ Número de días de riego.

$N_{ds} \rightarrow$ Número de días de la semana.

$Q_P \rightarrow$ Gasto instalado por planta (l/h).

Otra restricción del diseño agronómico establece que:

$$D_T \geq Nt$$

Continuación del diseño agronómico para sistemas de riego por goteo.

3. La siguiente expresión permite seleccionar los resultados de la prueba de campo y a continuación de las necesidades de agua de la planta constituyen el punto de partida del diseño.

$$0.9 \times pr < pb < 1.2 \times pr \quad (II.86)$$

Pbulbo. - Profundidad a que se desarrolla el bulbo húmedo (m), o la franja de humedecimiento continuo según corresponda.

Esta fórmula establece unos límites a la profundidad del bulbo húmedo, de forma que para determinados valores de (*pb*) corresponden un número de goteros por planta y un porcentaje adecuado de superficie humedecida que garantiza que el área mojada por todos los goteros que riegan una misma planta sea mayor que las necesidades mínimas definidas por (*PHmín*). Una vez obtenidas la (*Nt*), los resultados de la prueba de campo se acomodan en la Tabla 17 para encontrar los parámetros más apropiados para tales exigencias. A partir de la profundidad de ramificación densa del cultivo se comprueba por medio (II.4), la profundidad que alcanza el bulbo de humedecimiento durante la prueba de campo, ya que a partir de estos valores se asume el radio húmedo que alcanza el gotero, así como el volumen de agua que entrega en esas condiciones. A partir del rango de profundidad establecido (*pb*) se puede estimar el área humedecida (*Ae*) por éstos y la cantidad mínima (*e*) de ellos, necesarios para garantizar el volumen de suelo humedecido.

Tabla 17: Prueba de campo para el diseño agronómico de un sistema de riego por goteo.

Volumen del emisor(L)	Radio del bulbo (m)	Profundidad del bulbo(m)

4. Área mojada por el emisor [*Ae* (m^2)].

La superficie humedecida por emisor se estima por:

$$Ae = \pi \times Re^2 \quad (II.87)$$

Donde:

$Re \rightarrow$ Es el radio que humedece el gotero (m) y se obtiene directamente de la prueba de campo para la profundidad seleccionada.

La separación entre emisores en el lateral [*Se*, (m)] se puede obtener por medio de:

$$Se = Re \times \left(2 - \frac{a}{100}\right) \quad (II.88)$$

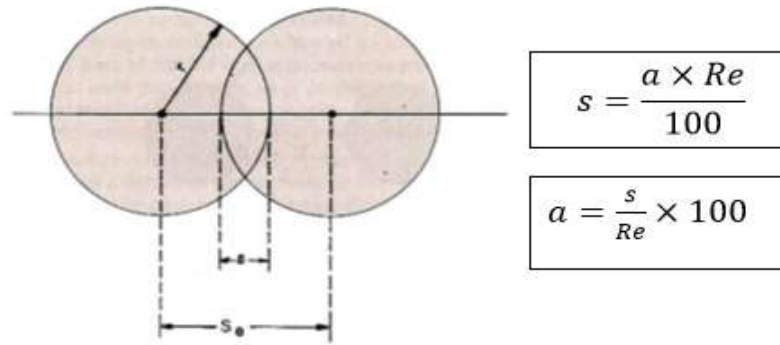


Figura 21: Solape entre bulbos húmedos. Arapa (2002).

Donde:

$a \rightarrow$ Es el porcentaje de solapamiento entre los bulbos húmedos, su valor puede oscilar entre el 10 y el 30%, siempre que se cumpla la condición ($Se < \phi_b$) que ha sido fijada por razones fisiológicas de la planta. Cuando se trata de un número entero de emisores por planta, (Se) es generalmente asumido en función de las separación entre plantas de una misma hilera. Ae Permite determinar el número de emisores por planta necesarios para garantizar el porcentaje de humedecimiento mínimo (para el ejemplo $PH_{\min} = 33\%$).

Tabla 18: Porcentaje de humedecimiento mínimo, Rodrigo (1997).

Autor	Descripción	$PH_{\min}$
Keller (1974)	Zonas de clima árido.	$PH_{\min} > 30\%$
Keller (1978)	Cultivos c/marco de siembra amplio. Zonas de alta precipitación. Textura media o arcillosa.	$PH_{\min} > 20\%$
	Zonas de baja precipitación	$33\% < PH_{\min} < 50\%$
Myers y Harrison (1973) Harrison y Myers (1974)	Zonas húmedas. Zonas de poca precipitación	$25\% < PH_{\min} < 50\%$
Torralba (1990)	Cítricos y Frutales (*).	$25\% < PH_{\min} < 35\%$
	Plátano (*).	$40\% < PH_{\min} < 60\%$
	Café (*).	$30\% < PH_{\min} < 40\%$
	Cultivos hortícolas (*).	$70\% < PH_{\min} < 50\%$
	Hidropónicos y macetas	100 %

(*) Los porcentajes varían desde el valor inferior al superior al aumentar la aridez del clima, la ligereza en textura y pedregosidad del suelo.

5. Número de emisores que humedecen una misma planta.

$$e \geq \frac{A_{MP} \times PH_{\min}}{100 \times Ae} \quad (II.89)$$

Donde:

A_{MP} → Área del marco de plantación (m^2), para el ejemplo 24 m^2 .

$PH_{\min}$ → Porcentaje de humedecimiento mínimo. En la Tabla 17 **se** recomiendan valores para el caso de árboles. Propone valores orientativos para las condiciones de Cuba.

Conviene comprobar que el volumen de agua previsto, satisface las necesidades de agua del cultivo y las de lavado en el caso de presencia de sales en la solución del suelo, para una frecuencia de riego determinada. La siguiente relación permite comprobar analíticamente este aspecto. (I) se asume diaria en la mayoría de los casos y Ve se

comprueba por: $Ve = \frac{I \times Nt}{e}$.

6. Tiempo de riego [Tr (h)].

Como el volumen aplicado por el gotero (Ve) debe ser $\geq$ (Nt), la duración del riego se obtiene por:

$$Tr = \frac{Nt}{e \times Qe} \quad (II.90)$$

Así la dosis de riego definitiva se obtiene por (II.9).

1. Dosis de riego [Dr (L)].

$$Dr = Tr \times e \times Qe. \quad (II.91)$$

VERIFICACIÓN DE LA RESTRICCIÓN PARA EL DISEÑO AGRONÓMICO

$$Dr \geq Nt \quad PHr \geq PHm \quad (II.92)$$

II.3.- Procedimiento para el diseño hidráulico.

Sistemas de riego por Aspersión Convencional:

Una vez definidos los aspectos considerados en el diseño agronómico se procede a realizar el diseño hidráulico, el cual consiste básicamente en determinar la combinación de diámetros y longitudes de tuberías que implique un régimen de presiones en la red de riego que garantice que los aspersores entreguen los caudales requeridos. El diseño se complementa con la elección del timbraje o la clase de estas tuberías y de los parámetros de funcionamiento de la instalación de bombeo, de manera que permita la selección del equipo adecuado y establecer los requerimientos para su funcionamiento, teniendo en cuenta los picos de variación de presión en toda la red y las preferencias del Inversionista.

Previo a cualquier cálculo se deberá analizar las condiciones topográficas de la parcela y realizar la planificación física de todo el sistema, en el sentido de lograr sobre la parcela la mejor distribución de la red de tuberías, es decir disposiciones respetuosas de la conservación de los suelos. Para ello se realiza un trazado preliminar el cual se va ajustando de acuerdo al cálculo hidráulico que se realiza, dado que el mismo como se ha referido anteriormente es un proceso de tanteos. Esta es una de las partes más complejas del diseño debido a las dificultades que implica el hecho de que las parcelas de riego pueden tener formas y dimensiones diferentes.

El diseño hidráulico se suele dividir en tres partes, esto es muy conveniente para la docencia y es práctica común entre los diseñadores, las mismas consideran lo siguiente:

- Diseño de las parcelas de riego (cálculo de las tuberías laterales y distribuidoras).
- Diseño de la red de conducción (tuberías conductoras y principales).
- Obtención de los parámetros de funcionamiento de la Instalación de Bombeo.

Diseño de las parcelas de riego:

Como resultado del diseño hidráulico de las parcelas deben quedar establecidos: el diámetro y longitud de los laterales, caudal en cada lateral y el régimen de presiones en los mismos, así como el diámetro y longitud de las tuberías distribuidoras, caudal en cada distribuidora y el régimen de presiones en las mismas. De lo hasta aquí considerado se deduce que lo más conveniente es comenzar el cálculo por las tuberías de menor orden cuyo fundamento proviene del Criterio de Christiansen , el cual establece que la diferencia de caudal entre los aspersores extremos de cada lateral no debe sobrepasar el 10 % del caudal promedio de los aspersores para la presión de diseño y para que esto se cumpla, la variación de presión a lo largo del mismo no debe sobrepasar el 20 % de la presión de diseño del mismo:

$$(Hf_{LAT} + \Delta Z_{LAT}) \leq 0.2 \times H_{ASP} \quad (II.93)$$

Donde:

$Hf_{LAT} \rightarrow$ Pérdidas de fricción en el lateral (mca).

$\Delta Z_{LAT} \rightarrow$ Diferencia de nivel entre los extremos del lateral (m).

$H_{ASP} \rightarrow$ Presión de trabajo en el aspersor (mca).

La **diferencia de nivel** entre los extremos del lateral se obtiene directamente del levantamiento topográfico de la parcela, la presión de trabajo del aspersor es un dato de entrada y **las pérdidas por fricción** en el lateral se obtiene por las ecuaciones propuestas por varios autores, las mismas fueron detalladas anteriormente, conviene adelantar que se puede utilizar la ecuación de Darcy – Weisbach y las correspondientes propuestas empíricas para obtener el valor de (f) en función del tipo de flujo y también las ecuaciones propuestas por Scobey y William - Hazen. Con relación al cálculo de este parámetro, conviene destacar que su solución parte de determinar el régimen de flujo que ocurre en la tubería a partir de conocer la rugosidad de la tubería y el **Número de Reynolds**, cuyo valor esta en dependencia del diámetro de la tubería, la viscosidad cinemática del fluido y la velocidad media de circulación del mismo, parámetro que a los efectos del programa no está limitado por los diferentes criterios de velocidad económica en tuberías circulares a sección llena, no obstante el usuario del programa podrá tener en cuenta el criterio de velocidad que considere adecuado [0.6 m/s (1m/s a 1.5 m/s) 2.25 m/s].

También es conveniente dejar claro que, para aligerar los cálculos de la tubería lateral, se ha adoptado como práctica, reducir las pérdidas para una tubería que entrega en ruta con salidas múltiples uniformemente espaciadas por un coeficiente (F) , en función del número de salidas y del coeficiente del gasto en la ecuación de las pérdidas, esto evita lo trabajoso que resulta el tener que realizar el cálculo del lateral tramo a tramo. El valor de (F) viene dado por:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2*n} + \frac{\sqrt{m-1}}{6*n^2} \quad (\text{II.94})$$

Donde:

$F \rightarrow$ Factor para corregir las pérdidas de presión en una tubería que entrega en ruta (mca).

$m \rightarrow$ Exponente del gasto en la ecuación de las pérdidas.

$n \rightarrow$ Número de salidas uniformemente espaciadas.

El hecho de introducir el coeficiente (F) para estimar las pérdidas de presión, se complementa al establecer el criterio de que el 75 % de estas pérdidas, que se producen en la tubería lateral ocurren en la primera mitad de la tubería, asumiendo entonces que el aspersor que funciona con la presión media se encuentra ubicado precisamente a esa

distancia del extremo del lateral. De esta forma, al describir las expresiones para calcular el régimen de presiones en las tuberías laterales, aplicando Bernoulli quedaría:

PRESIÓN AL INICIO DEL LATERAL:

$$h_{INI} = H_{ASP} + 0.75 \times hf_{LAT} + \frac{\Delta Z_{LAT}}{2} + H_{ELE} \quad (II.95)$$

Donde:

h_{INI} → Presión al inicio del lateral (mca).

H_{ASP} → Presión de trabajo del aspersor (mca).

hf_{LAT} → Pérdidas por fricción entre el inicio y final del lateral (mca).

ΔZ_{LAT} → Diferencia de nivel entre el inicio y final del lateral (m).

H_{ELE} → Altura del elevador del aspersor (m), se incluyen para este caso las pérdidas locales debidas a la conexión de los hidrantes.

Pérdidas por fricción entre el inicio y final del lateral (mca):

$$hf_{LAT} = 10.67 \times \left(\frac{Q_{LAT}}{C_{HW}} \right)^{1.852} \times \phi_{LAT}^{-4.869} \times F_{LAT} \times L_{LAT} \quad (II.96)$$

Donde:

Q_{LAT} → Caudal que circula por el lateral y que depende del número de aspersores y del caudal del aspersor (m³/s).

ϕ_{LAT} → Diámetro interior del lateral (m).

F_{LAT} → Coeficiente de pérdidas por salidas múltiples uniformemente espaciadas a lo largo del lateral (adimensional).

L_{LAT} → Longitud del lateral (m).

C_{HW} → Coeficiente de pérdidas en función de la edad de la tubería (adimensional).

PRESIÓN AL FINAL DEL LATERAL:

$$h_{FIN} = h_{INI} - hf_{LAT} - \Delta Z_{LAT} \quad (II.97)$$

Donde:

h_{FIN} → Presión al final del lateral (mc).

h_{INI} → Presión al inicio del lateral (mca).

hf_{LAT} → Pérdidas por fricción entre el inicio y final del lateral (mca).

ΔZ_{LAT} → Diferencia de nivel entre el inicio y final del lateral (m).

VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL LATERAL:

$$\Delta h_{LAT} = |h_{INI} - h_{FIN}| \quad (II.98)$$

Donde:

Δh_{LAT} → Variación de presión en el lateral (mca).

h_{INI} → Presión al inicio del lateral (mca).

h_{FIN} → Presión al final del lateral (mc).

CRITERIO DE UNIFORMIDAD:

Su fundamento proviene del **Criterio de Christiansen** (o la bien conocida **Regla del 20 %**), la cual establece que la diferencia de caudal entre los aspersores extremos de cada lateral no debe sobrepasar el 10 % del caudal promedio de los aspersores para la presión de diseño y para que esto se cumpla, la variación de presión a lo largo del mismo no debe sobrepasar el 20 % de la presión de diseño del mismo, esto es:

$$(Hf_{LAT} + \Delta Z_{LAT}) \leq 0.2 \times H_{ASP} \quad (II.99)$$

Donde:

Hf_{LAT} → Pérdidas de fricción en el lateral (mca).

ΔZ_{LAT} → Diferencia de nivel entre los extremos del lateral (m).

H_{ASP} → Presión de trabajo en el aspersor (mca).

La diferencia de nivel entre los extremos del lateral se obtiene directamente del levantamiento topográfico de la parcela, la presión de trabajo del aspersor es un dato de entrada y las pérdidas por fricción en el lateral se obtienen por formula. Para el caso de las tuberías distribuidoras, el tratamiento suele ser diferente, pues los espaciamientos entre las salidas son por lo general mucho mayores, del orden de los 18m y salvo en los casos de sistemas fijos, estas tuberías nunca funcionan simultáneamente. De esta forma las pérdidas no son corregidas por el factor (F) y tampoco se estiman solamente para el 75% de toda su longitud, por estas razones el régimen de presiones se obtiene aplicando la ecuación de Bernoullí (simplificada).

$$H_{FIN} = h_{INI} + H_{PROF} + H_{LOC} \quad (II.100)$$

$$H_{INI} = H_{FIN} + Hf_{FIN-INI} + \Delta Z_{FIN-INI} \quad (II.101)$$

$$\Delta H_{DIST} = |H_{INI} - H_{FIN}| \quad (II.102)$$

Donde:

H_{FIN} → Presión al final de la distribuidora (mca).

H_{INI} → Presión al inicio de la distribuidora (mca).

$\Delta H_{DIST} \rightarrow$ Variación de presión en la distribuidora (mca).

$H_{LOC} \rightarrow$ Pérdidas locales debida a los accesorios (mca).

$H_{PROF} \rightarrow$ Profundidad a que esta soterrada la distribuidora (m).

$Hf_{FIN-INI} \rightarrow$ Pérdidas por fricción entre el inicio y final de la distribuidora (mca).

$\Delta Z_{FIN-INI} \rightarrow$ Diferencia de nivel entre el inicio y final de la distribuidora (m).

Variación de presión admisible:

$$\Delta H_{adm} = hf_{lat} + \Delta Z_{lat} + hf_{dist} + \Delta Z_{dist} \quad (II.103)$$

$$\Delta H_{adm} \leq 20\% H_{asp} \quad (II.104)$$

Presión en la válvula:

$$H_V = H_{ini} + hf_{(Hini-V)} + \Delta Z_{(Hini-V)} \quad (II.105)$$

Para estos casos el valor de la tolerancia de caudales propuesto por Christiansen es más discutible y ha sido modificado por varios autores, los criterios han sido más bien de tipo económico, pues como ya se ha visto, los resultados estarán en función de la longitud y diámetro de las tuberías. En este sentido, Selléz y Ferreyra, proponen diseñar las tuberías distribuidoras con el criterio del 15%, que significa que en total se admita en la parcela de riego una variación de presión del 35% de la presión de trabajo del aspersor, **(20% + 15%)**, de lo cual se deduce que la variación entre el caudal que entrega el aspersor que ocupa la primera posición en la parcela y el último aspersor del lateral que ocupa la última posición, no excederá del 18%. Esto se corresponde con un 83% de uniformidad de entrega de los aspersores, valor que se considera adecuado para Riego por Aspersión.

Por otro lado, García y Fontova, prefieren asumir para el diseño el criterio del 25%, que significa que en total se admita en la parcela de riego una variación de presión del 45% de la presión de trabajo del aspersor, **(20% + 25%)**, de lo cual se deduce que la variación entre el caudal que entrega el aspersor que ocupa la primera posición en la parcela y el último aspersor del lateral que ocupa la última posición, excederá del 20%. Esto se corresponde con una menor uniformidad de entrega de los aspersores, pero a su vez redundaría en un menor costo de inversión en tuberías. Esta cuestión sugiere un análisis de optimización donde se puedan analizar costos y beneficios.

La **variación de presión real de la distribuidora** se obtiene por:

$$(Hf_{DIST} + \Delta Z_{DIST}) \leq 0.1 \times H_{ASP} \quad (II.106)$$

Donde:

$H_{fLAT} \rightarrow$ Pérdidas de fricción en el lateral (mca).

$\Delta Z_{LAT} \rightarrow$ Diferencia de nivel entre los extremos del lateral (m).

$H_{ASP} \rightarrow$ Presión de trabajo en el aspersor (mca).

En cualquiera de los casos es necesario comprobar que la mayor variación de presión que se manifieste en la tubería de que se trate, debe ser menor que la admisible según el criterio escogido.

La expresión deducida por Darcy – Wisbach y la única que permite la evaluación apropiada del efecto de cada uno de los factores que afectan la pérdida de carga, la ventaja de esta fórmula es que puede aplicarse en todos los tipos de flujo, debiendo calcular adecuadamente, los valores adecuados del coeficiente de fricción f , en este caso el valor de las pérdidas así obtenido se reduce por el coeficiente F , según se trate de una tubería de salidas múltiples uniformemente espaciadas o no:

Sistemas de riego por Aspersión con Pivote Central eléctrico:

Presión del pivote:

$$H_P = H_{asp} + h_P + \Delta Z_P + hf_P \quad (II.107)$$

$H_P \rightarrow$ Presión del pivote (mca).

$H_{asp} \rightarrow$ Presión del aspersor (mca).

$hf_P \rightarrow$ Pérdidas de energía a lo largo del pivote (m).

$\Delta Z_P \rightarrow$ Desnivel a lo largo del pivote (m).

Pérdidas de energía a lo largo del pivote:

$$hf_P = 10.649 \times \left(\frac{Q_P}{C}\right)^{1.852} \times \phi^{-4.87} \times L \times 0.543 \quad (II.108)$$

$hf_P \rightarrow$ Pérdidas de energía a lo largo del pivote (m).

$Q_P \rightarrow$ Caudal del pivote (m^3/s).

$C \rightarrow$ Coeficiente de pérdidas en función de la edad de la tubería (adimensional).

$\phi \rightarrow$ Diámetro del pivote (m).

$L \rightarrow$ Longitud del pivote (m).

Sistemas de riego por Aspersión con Enrolladores:

Pérdidas de energía en la manguera:

$$h_{f_{mang}} = 4.093 \times 10^{-3} \times K_S \times Q_E^{1.9} \times \phi^{-4.9} \times L \quad (II.109)$$

$h_{f_{mang}} \rightarrow$ Pérdidas de energía en la manguera (m).

$K_s \rightarrow$ Coeficiente de pérdidas de Scobey.

$Q_E \rightarrow$ Caudal del emisor (m^3/s).

$\emptyset \rightarrow$ Diámetro de la manguera (m).

$L \rightarrow$ Longitud de la manguera (m).

Presión en el hidrante.

$$H_{HIDRANTE} = H_E + h_{enrollador} + hf_m + hf_{loc} \quad (II.110)$$

$H_H \rightarrow$ Presión en el hidrante (mca).

$H_E \rightarrow$ Presión en el enrollador (mca).

$h_e \rightarrow$ Altura del enrollador (m).

$hf_m \rightarrow$ Perdidas de carga en la manguera (m).

$hf_l \rightarrow$ Perdidas locales (m).

Presión en la válvula

$$H_V = H_{HIDRANTE} + hf_{(H1-V)} + \Delta Z_{(H1-V)} \quad (II.111)$$

$H_V \rightarrow$ Presión en la válvula (mca).

$hf_{(H1-V)} \rightarrow$ Perdidas de carga desde el hidrante hasta la válvula (m)

$\Delta Z_{(H1-V)} \rightarrow$ Desnivel desde el hidrante hasta la válvula (m)

Sistemas de Riego Localizado:

Emisor Autocompensante:

Para comenzar con el diseño hidráulico para un emisor autocompensante lo primero que se debe de conocer es que el rango de presión en el cual se debe encontrar el emisor es entre 5 y 30 mca, este dato es proporcionado por el fabricante del mismo.

Presión al inicio del lateral:

$$h_0 = H_e + (0.77 \times hf_{lat}) + \frac{\Delta Z_{lat}}{2} \quad (II.112)$$

$$5mca \leq h_0 \leq 30mca$$

$h_0 \rightarrow$ Presión al inicio del lateral (mca).

$H_e \rightarrow$ Presión de trabajo del aspersor (mca).

$hf_{lat} \rightarrow$ Perdidas de carga en el lateral (mca).

$\Delta Z_{lat} \rightarrow$ Desnivel en el lateral (m).

Pérdidas de carga en el lateral:

$$hf_{lat} = J \times F \times L_{lat} \quad (II.113)$$

$J \rightarrow$ Pérdidas por rozamiento hidráulico.

$F \rightarrow$ Coeficiente de pérdidas por salidas múltiples.

$L_{lat} \rightarrow$ Longitud del lateral (m).

Coeficiente de pérdidas por salidas múltiples:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2n} + \frac{\sqrt{m-1}}{6 \times n^2} \quad (\text{II.114})$$

$m \rightarrow$ Exponente del gasto en la ecuación de las pérdidas.

$n \rightarrow$ Numero de emisores en el lateral.

Pérdidas por rozamiento hidráulico:

$$J = 0.473 \times \emptyset^{-4.75} \times Q_{lat}^{1.75} \quad (\text{II.115})$$

$J \rightarrow$ Pérdidas por rozamiento hidráulico (m/m).

$\emptyset \rightarrow$ Diámetro del lateral (mm).

$Q_{lat} \rightarrow$ Caudal del lateral (l/h).

Gradiente Hidráulico:

$$J^l = J \times \left(\frac{S_e + L_e}{S_e} \right) \quad (\text{II.116})$$

$L_e \rightarrow$ Longitud equivalente de la conexión de un emisor (m).

$S_e \rightarrow$ Separación entre emisores (m).

$J' \rightarrow$ Gradiente hidráulico

Caudal del lateral.

Separación entre emisores de un mismo lateral:

$$S_e = R_e \times \left(2 - \frac{a}{100} \right) \quad (\text{II.117})$$

$R_e \rightarrow$ Radio del emisor (m).

$a \rightarrow$ Porcentaje de solapamiento (%).

Longitud equivalente de la conexión de un emisor:

$$L_e = 18.91 \times \emptyset^{-1.87} \quad (\text{II.118})$$

$$Q_{lat} = Q_e \times N_{elat} \quad (\text{II.119})$$

$N_{elat} \rightarrow$ Número de emisores en el lateral:

$Q_e \rightarrow$ Caudal del emisor (L/h).

Caudal del emisor.

$$Q_e = K \times H_e^x \quad (\text{II.120})$$

$Q_e \rightarrow$ Caudal del emisor (L/h).

$X \rightarrow$ Exponente de descarga del emisor.

$H_e \rightarrow$ Presión de trabajo del emisor (mca).

$K \rightarrow$ Coeficiente de descarga del emisor

Presión mínima en el lateral.

$$h_{min} = h_0 - hf_{lat} - \Delta Z_{lat} \quad (II.121)$$

$h_0 \rightarrow$ Presión mínima en el lateral (mca).

$\Delta Z_{lat} \rightarrow$ Desnivel en el lateral (m).

$hf_{lat} \rightarrow$ Perdidas de carga en el lateral (mca).

$$5mca \leq h_{min} \leq 30mca$$

Variación de presión en el lateral.

$$\Delta H_{lat} = h_0 - h_{min} \quad (II.122)$$

$$5mca \leq \Delta h_{lat} \leq 30mca$$

Para continuar con el diseño hidráulico debe conformarse la siguiente tabla:

Tabla 19: Proceso de determinación de las presiones a lo largo de la de la tubería distribuidora. (creación propia)

Tramo	Q_T (L/s)	$\varnothing_T$ (mm)	V_T (m/s)	L_T (m)	J (m/m)	ΔZ_T (m)	hf_T (mca)	H_i (mca)
Σ								

Presión al inicio de la distribuidora:

$$\frac{\Sigma H_i}{\#_{lat}} = h_0 \quad (II.1223)$$

Despejar H_{0tramo} (mca) y calcular.

$$5mca \leq H_0 \leq 30mca$$

Presión mínima en la distribuidora:

Es la presión mínima ($H_{míndist}$) de la Tabla 18.

$$5mca \leq H_{míndist} \leq 30mca$$

Presión mínima en la parcela:

$$H_{mínPR} = H_{míndist} - \Delta h_{lat} \quad (II.124)$$

$$5mca \leq H_{mínPR} \leq 30mca$$

Caudal en la válvula:

$$Q_V = Q_{dist} = Q_{lat} \quad (II.125)$$

$Q_v \rightarrow$ Caudal en la válvula (m^3/s).

$Q_{dist} \rightarrow$ Caudal en la distribuidora (m^3/s).

$Q_{lat} \rightarrow$ Caudal en el lateral (m^3/s).

Presión en la bomba:

$$H_B = H_{V1} + hf_{(V1-B)} + \Delta Z_{(V1-B)} \quad (II.126)$$

$H_B \rightarrow$ Presión en la bomba (mca).

$H_{V1} \rightarrow$ Presión en la válvula más alejada (mca).

$\Delta Z_{(V1-B)} \rightarrow$ Desnivel desde la válvula hasta la bomba (m).

$hf_{(V1-B)} \rightarrow$ Perdidas de carga desde la válvula hasta la bomba (mca).

Caudal en la bomba:

$$Q_V = \Sigma Q_{lats} \quad (II.127)$$

Emisor No Autocompensante:

Tolerancia de caudales:

$$CU = 1 - \left[\left(\frac{1.27 \times C_V}{e^{0.5}} \right) \right] \times \frac{Q_{min}}{Q_{med}} \quad (II.128)$$

$CU \rightarrow$ Coeficiente de Uniformidad de riego.

$C_V \rightarrow$ Coeficiente de variación de fabricación del emisor.

$e \rightarrow$ Número de emisores que suministran agua a una misma planta.

$Q_{min} \rightarrow$ Caudal mínimo (l/h).

$Q_{med} \rightarrow$ Caudal medio o caudal del emisor (l/h).

$K \rightarrow$ Coeficiente de descarga del emisor.

$H \rightarrow$ Presión de trabajo del emisor (mca)

$$Q_{med} = K \times H^{0.4884} \quad (II.129)$$

$$Q_{min} = \frac{(CU \times Q_{med})}{\left[1 - \left(\frac{1.27 \times C_V}{e^{0.5}} \right) \right]} \quad (II.130)$$

Tolerancia de presiones:

$$H_{min} = \left(\frac{Q_{min}}{K} \right)^{\frac{1}{x}} \quad (II.131)$$

$H_{min} \rightarrow$ Presión media (mca).

La continuación del proceso a partir de aquí es el mismo que el de los emisores autocompensantes desde (II.112) hasta (II.127).

Capítulo III: Consideraciones sobre la impartición de la asignatura Ingeniería de Riego.

III.1.- Programa Analítico de la signatura Ingeniería de Riego.

OBJETIVOS EDUCATIVOS E INSTRUCTIVOS

Formar un Ingeniero Hidráulico que al terminar sus estudios de pregrado y etapa de adiestramiento laboral sea capaz de:

Con dignidad, honestidad, responsabilidad, humanismo, laboriosidad, objetividad, audacia creativa, patriotismo, solidaridad, calidad y belleza, empleando software profesionales, aplicando normas y regulaciones vigentes en el país, usando bibliografía especializada, con un enfoque científico y medioambiental y con un alto compromiso social y patriótico de diseñar desde el punto de vista hidráulico y agronómico, los sistemas de riego que más comúnmente se utilizan en el sistema de la Agricultura en Cuba, teniendo en cuenta las características del complejo Agua – Suelo – Planta – Clima de cada escenario, así como los aspectos tecnológicos y de tipo ambiental que propicien la producción de alimentos agrícolas y contribuyan a alcanzar la soberanía alimentaria en el país.

CONTENIDOS

a) Conocimientos básicos a adquirir

- Características fundamentales de los sistemas de riego **(SEMIPRESENCIAL)**.
- Necesidades de agua de los cultivos agrícolas.
- Método de riego superficial. Técnicas de riego por surcos, por bandas y por terrazas planas **(NO PRESENCIAL)**.
- Método de riego por aspersión. Técnicas de riego convencional, pivote central y enrolladores.
- Método de riego localizado. Técnicas de riego por goteo y microaspersión.
- Parámetros de impulsión y selección de bombas para riego.
- Esquemas de explotación en sistemas por gravedad y presurizado.

b) Habilidades básicas a dominar

- Caracterizar las técnicas de riego utilizadas en el sistema de la agricultura en Cuba.
- Dominar criterios de selección de las técnicas de riego.
- Identificar los principales efectos ambientales de los sistemas de riego.
- Calcular los requerimientos hídricos de los cultivos.
- Dominar los fundamentos teóricos del diseño de las diferentes técnicas de riego

- Calcular los parámetros tecnológicos de un sistema de riego superficial.
- Caracterizar el complejo agua – suelo – planta – clima como paso previo para diseñar un sistema de riego.
- Diseñar los componentes de un sistema de riego por aspersión.
- Diseñar los componentes de un sistema de riego localizado.
- Desarrollar esquemas hidráulicos de sistemas de riego y determinar los parámetros de impulsión de la instalación de bombeo.

c) Valores de la Carrera a que tributa

Estos valores se encuentran explicados en el modelo del profesional.

- Responsabilidad.
- Laboriosidad.
- Objetividad.
- Audacia Creativa.
- Solidaridad.
- Compañerismo.
- Honradez.

Tabla 20:PLAN TEMÁTICO (Curso 2020 - 2021)

#	TEMAS	HORAS			
		TOTAL	C	CP	T
I	Generalidades de los sistemas de riego.	4	4	-	-
II	Necesidades de agua de los cultivos.	9	2	4	3
III	Sistemas de Riego por Aspersión.	17	4	12	9
IV	Sistemas de Riego Localizado.	14	4	8	6
	PP1	2			
	PP2	2			
	CLI	4			
#	TOTALES	64	14	24	18

Tabla 21: ESTRUCTURA DE CADA TEMA (curso 2020 - 2021)

#	Objetivos Instructivos	Sistemas de Conocimientos	Sistemas de Habilidades
1	Caracterizar los sistemas de riego más utilizados en Cuba. Diseñar los parámetros tecnológicos de un sistema de riego superficial y confeccionar el esquema de explotación, teniendo en cuenta los parámetros de impulsión de la estación de bombeo.	Generalidades de los sistemas de riego. Definición, importancia, clasificación, ventajas e inconvenientes, principales características. Criterios de selección de técnicas de riego, efectos ambientales. Sistemas de riego superficial. Parámetros tecnológicos. Criterios de diseño. Esquemas de riego superficial.	Procedimientos de diseño de los parámetros tecnológicos de sistemas de riego con terrazas planas, por bandas y riego por surcos con pendiente y final abierto y con reducción de caudal. Esquemas de explotación, calcular y trazar los elementos de la red de abastecimiento Planificar la explotación de un sistema de riego superficial.
2	Calcular los requerimientos hídricos de los cultivos teniendo en cuenta el complejo Agua – Suelo – Planta – Clima y confeccionar esquemas de explotación preliminares de los sistemas de riego.	Propiedades hidrofísicas de los suelos agrícolas. Relaciones suelo – agua: estados de humedad del suelo. Curvas de retención de humedad. Velocidad de infiltración. Necesidades de agua de los cultivos. Evapotranspiración de referencia. Coeficientes de cultivo. Evapotranspiración del cultivo Ecuación FAO – Penman – Monteith. Evaporímetro de cubeta clase A. coeficiente de corrección del tanque.	Representar esquemas preliminares de sistemas de riego. Confeccionar el gráfico del uso consuntivo del cultivo. Calcular el coeficiente de cultivo para diferentes fases del ciclo vegetativo calcular la capacidad de almacenamiento del suelo. Calcular la evapotranspiración de referencia. Calcular la evapotranspiración del cultivo.
3	Diseñar sistemas de riego por aspersión convencional semifijo, con pivotes centrales eléctricos y con Enrolladores y desarrollar esquemas	Componentes de los sistemas de riego por aspersión convencional y mecanizado. Principio de funcionamiento. Fundamentos teóricos del diseño. Esquemas hidráulicos para riego por aspersión	Calcular los parámetros necesarios para el diseño agronómico e hidráulico de un sistema riego por aspersión convencional semifijo, con pivote central eléctrico y con enrolladores. Calcular la dosis, frecuencia y duración del riego, así como seleccionar los

	de explotación acoplado a la estación de bombeo.	convencional semifijo, pivote central eléctrico y enrolladores. Procedimientos para el diseño de sistemas de riego por aspersión. Parámetros de impulsión de la instalación de bombeo.	diámetros y longitudes de tramo de tuberías que conlleven a un régimen de presiones apropiado en la red de riego. Confeccionar el esquema hidráulico y calcular los parámetros de funcionamiento de la estación de bombeo y saber seleccionar la bomba apropiada para el funcionamiento del sistema de riego.
4	Diseñar sistemas de riego localizado, con goteo y con microaspersores y desarrollar esquemas de explotación acoplado a la estación de bombeo.	Componentes de los sistemas de riego localizado. Principio de funcionamiento. Fundamentos teóricos del diseño. Esquemas hidráulicos para riego localizado. Procedimientos de diseño para sistemas de riego por goteo y microaspersión. Estaciones de control y para el filtrado Accesorios para la regulación, medición y control. Parámetros de impulsión de la estación de bombeo.	Calcular los parámetros necesarios para el diseño agronómico e hidráulico de un sistema riego por goteo y microaspersión. Calcular la dosis, frecuencia y duración del riego, así como los diámetros y longitudes de tuberías que garantizan un régimen de presiones apropiado en la red. Confeccionar el esquema hidráulico y calcular los parámetros de funcionamiento de la estación de bombeo. Seleccionar la bomba apropiada para el sistema de riego.

INDICACIONES METODOLÓGICAS Y DE ORGANIZACIÓN DE LA ASIGNATURA

Las horas totales se distribuyen en 7 conferencias (14 horas), 14 clases prácticas (28 horas) y 6 talleres (18 horas). Las habilidades planificadas se logran en las actividades prácticas. Se favorece la preparación de los estudiantes en el uso de la computación y el idioma inglés y su capacidad para presentar información que cumpla con las reglas de redacción, ortografía y presentación de documentos profesionales. Se orientan además Trabajos Extraclases que contribuyen a desarrollar en los estudiantes la preparación individual y el trabajo en grupo. El componente laboral investigativo se complementa con la asignatura optativa 3, que aborda investigaciones aplicadas a obras hidráulicas lineales de mediana complejidad como son los sistemas de riego y drenaje agrícola. Además, se prevén 4 horas de visitas técnicas a sistemas de riego en funcionamiento. Los contenidos impartidos se evalúan periódicamente en las CP y Talleres. Las actividades evaluativas consideran el

trabajo independiente de los estudiantes, el uso de las TIC, la toma de decisiones y su presentación, así como la utilización del idioma inglés.

BIBLIOGRAFÍA

Tabla 22: Texto Básico.

Autor	Título	Editorial	País	Año
Dr. Ernesto García y MSc. Ing. Martha Fontova	Ingeniería de Riego	Félix Varela	Cuba	2001

Tabla 23: Textos Complementarios.

Autor	Título	Editorial	País	Año
Allen <i>et al</i> ,	Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO 56.	FAO	Italia	1998
Pizarro, F. Cabello	Riegos Localizados de alta frecuencia (RLAF), goteo, Microaspersión y exudación.	Mundi – Prensa	España	1996
J.M. Tarjuelo Martín – Benito.	El riego por aspersión y sus tecnologías.	Mundi – Prensa	España	2005
Folletos de apoyo a la docencia y otros textos disponibles en el Entorno Virtual Automatizado y en la Carpeta Metodológica de la Asignatura.				

FORMAS DE ENSEÑANZA Y MÉTODOS

Del fondo total de la asignatura (64 horas), el (78 %) se dedica a las actividades prácticas (50 horas). El fondo dedicado a las conferencias (14 horas), utiliza literatura actualizada sobre el tema del diseño de sistemas de riego superficial, aspersión y localizado, donde se abordan las técnicas de riego que se utilizan en la práctica agrícola cubana con un enfoque práctico que contribuye a los modos de actuación del Ingeniero Hidráulico en el campo de los sistemas de regadío. Las actividades prácticas están enfocadas a preparar al estudiante para diseñar los sistemas de riego que más se utilizan en Cuba.

SISTEMA DE EVALUACIÓN

1. Actividades periódicas

- Se imponen ejercicios propuestos como auto preparación para los Talleres, que son revisados y evaluados. Se evalúa la participación y desarrollo de los estudiantes en las clases prácticas, así como en conferencias y talleres, mediante preguntas de comprobación al inicio de la actividad anterior.

2. Actividades parciales (planificadas en P4)

- Tarea extraclase No.1 correspondiente al tema I. Se aplican los Programas Directores de ICT y las TIC, se orientan la búsqueda y revisión bibliográfica en INTERNET de los temas relacionados con la evaluación técnica del método de riego superficial.
- Trabajo de Control Extraclase correspondiente al tema II. Se aplican los Programas Directores de ICT y las TIC, se orientan la búsqueda y revisión bibliográfica en INTERNET de los temas relacionados con el diseño de sistemas de riego superficial.
- Prueba Parcial No.1, al final del tema III donde se evalúan los conocimientos y las habilidades adquiridas por los estudiantes con relación al diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por aspersión convencional semifijo, de pivote central y con enrolladores.
- Prueba Parcial No.2, al final del tema IV donde se evalúan los conocimientos y las habilidades adquiridas por los estudiantes con relación al diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego localizado con técnicas de goteo y microaspersión.

SOFTWARE PROFESIONALES

Se gestiona CROPWAT, software para la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos.

PROGRAMAS DIRECTORES

1. Computación.

TEMA	ACTIVIDAD	PROGRAMA	TIEMPO	T. INDEPENDIENTE	EVALUACIÓN
I	TAREA EXTRACLASE No.1, SE IMPONE EN LA CONF. # 1	WORD, OUTLOOK EXPRESS, WINRAR INTERNET	6 HORAS	BÚSQUEDA Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	ENTREGA POR CORREO ELECTRÓNICO
II	TRABAJO DE CONTROL EXTRACLASE No.2, SE IMPONE EN LA CONF. # 3	WORD, OUTLOOK EXPRESS, WINRAR INTERNET	6 HORAS	BÚSQUEDA Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	ENTREGA POR CORREO ELECTRÓNICO

2. Información Científico-Técnica

Se promueve el interés por la búsqueda y revisión bibliográfica referida a las generalidades de los sistemas de riego.

Tabla 24:H.Plan calendario.

Actividad		Semana	Horas	Contenido	MTE	Observaciones
#	Tipo					
1	C1	1	2	Generalidades de los sistemas de riego. Definición. Importancia. Clasificación. Ventajas e inconvenientes. Características principales. Criterios de selección. Efectos ambientales.	P.T. B.	Se orienta Trabajo Extraclase # 1 (I ₁).
2	C2	1	2	Relaciones A – S – P – C. Propiedades hidrofísicas de los suelos agrícolas. Estados de humedad. Curvas de retención. Velocidad de Infiltración. Capacidad de almacenamiento. Necesidades de agua de los cultivos. ET_o ; K_c ; ET_c . Esquemas de riego preliminares.	P.T. B.	
3	CP1	1	2	Cálculo de la capacidad de almacenamiento del suelo. Cálculo de la curva de consumo del cultivo: K_c para las fases inicial, media y final.	P.T. B.	

4	CP2	2	2	Cálculo de <i>ETc</i> . Cálculo de los parámetros del riego. Cálculo de la frecuencia de riego, estimación de la duración del riego y el Tiempo de operación diaria del sistema.	P.T. B.	
5	T1	2	3	La campificación en los sistemas de riego. Elaboración de esquemas preliminares.	P.T. B.	
6	C3	3	2	Sistemas de riego superficial. Consideraciones básicas y criterios de diseño. Parámetros tecnológicos. Procedimientos para el diseño de sistema de riego por surcos, por banda y con terrazas planas.	P.T. B.	Se orienta Trabajo de Control Extraclase # 1.
7	C4	3	2	Sistemas de riego por aspersión convencional y mecanizado. Fundamento teórico del diseño. Esquemas de riego. Diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por aspersión convencional semifijo.	P.T. B.	
8	CP3	4	2	Procedimientos para el diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por aspersión semifijo.	P.T. B.	
9	CP4	4	2	Procedimientos para el diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por aspersión semifijo.	P.T. B.	
10	T2	4	3	Diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por aspersión convencional semifijo. Parámetros de impulsión. Esquemas de riego.	P.T. B.	
11	C5	5	4	Sistemas de riego por aspersión mecanizado. Pivote Central eléctrico y Enrolladores. Procedimiento para el diseño agronómico e hidráulico.	P.T. B.	
12	CP5	5	2	Procedimientos para el diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por aspersión con máquinas de riego de pivote central eléctrico.	P.T. B.	
13	CP6	6	2	Procedimientos para el diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por aspersión con máquinas de riego de pivote central eléctrico.	P.T. B.	
14	T3	6	3	Diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por aspersión con pivotes central eléctrico. Parámetros de impulsión. Esquemas de riego.	P.T. B.	

15	CP7	7	2	Procedimientos para el diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por aspersión con Enrolladores.	P.T. B.	
16	CP8	7	2	Procedimientos para el diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por aspersión con Enrolladores.	P.T. B.	
17	T4	7	3	Diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por aspersión con Enrolladores. Parámetros de impulsión. Esquemas de riego.	P.T. B.	
18	CP9	8	2	Diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por aspersión.	P.T. B.	Prueba Parcial 1
19	C6	9	2	Sistemas de riego localizado de alta frecuencia. Fundamento teórico del diseño. Esquemas de riego. Diseño agronómico de sistemas de riego por goteo y microaspersión.	P.T. B.	
20	C7	9	2	Diseño hidráulico de sistemas de riego por goteo y microaspersión.	P.T. B.	
21	CP1 0	10	2	Procedimientos para el diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por goteo.	P.T. B.	
22	CP1 1	10	2	Procedimientos para el diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por goteo.	P.T. B.	
23	T5	10	3	Diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por goteo. Parámetros de impulsión. Esquemas de riego.	P.T. B.	
24	CP1 2	11	2	Procedimientos para el diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por microaspersión.	P.T. B.	
25	CP1 3	11	2	Procedimientos para el diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por microaspersión.	P.T. B.	
26	T6	11	3	Diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego por microaspersión. Parámetros de impulsión. Esquemas de riego.	P.T. B.	
27	CP1 4	12	2	Diseño agronómico e hidráulico de sistemas de riego localizado.	P.T. B.	Prueba Parcial 2

CONCLUSIONES

1. El Programa Analítico de la asignatura Ingeniería de Riego propuesto, contribuye a incrementar la competitividad de los egresados de la Especialidad de Ingeniería Hidráulica en la región oriental de Cuba.
2. Ha sido sustentado un sistema de conocimientos y habilidades que tiene en cuenta las exigencias del diseño y las particularidades de las tecnologías de riego presurizado que se están introduciendo en las Empresas Agropecuarias.
3. Se caracterizó el estado actual del arte de las tecnologías de riego presurizado, así como el fundamento teórico para su diseño, esto permitió actualizar los procedimientos para el diseño agronómico e hidráulico de los sistemas de riego presurizados que actualmente se introducen en la agricultura cubana.

RECOMENDACIONES

Debido al poco tiempo contado para la realización del Trabajo de Diploma quedaron algunas técnicas de riego por analizar por analizar:

Proponer futuros Trabajos de Diploma que aborden las técnicas por Lateral de avance frontal y Riego superficial unas sus diversas modalidades.

Desarrollar las metodologías de diseño para los sistemas de riego por aspersión convencional en sus modalidades de sistema Fijo y Móvil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bibliografía

.R.C, D. (1972). *Center pivot sprenkler design based on intake characteristics*. Trnas ASAE.

Boswell, M. J. (1990 “). *Irrigation Design Manual*”. *James Hardie Irrigation (IBERIA)* . Sevilla. España.: Micro –S. A. 41 700 Dos Hermanas. .

Del Castillo, L. (1997). *La ciencia para todos. Fondo de Cultura Económica*.

G., C. L. (1991). *Riego por aspersión*. Madrid. España. : Ediciones Mundi –Prensa.

Li, J. Z. (2003). *Water and Nitrogen Distribution as Affected by Fertigation of Ammonium Nitrate from a Point Source*.

López, R. (1997). *Riego Localizado. 2da edición*. . CENTER. Ediciones Mundi – Prensa. ISBN 84 – 7114 – 677 – 0.

Martín-Benito, J. T. (2005). *El Riego por Aspersión y su Tecnología*. Madrid.España: Ediciones.Mundi-Prensa.

Pizarro, C. (1996). *Riegos Localizados de Alta Frecuencia (RLAF)*. Madrid.España: Editorial Agrícola Española, S.A., Madrid, 1996, .

R.D, K. y. (1990). *Spinkle and tickle irrigation*. New York: Avi Book, Van Nostrand Reinhold.

www.agro-tecnologia-tropical.com. (s.f.).

ANEXOS

III.2.- Ejercicios resueltos.

Ejercicio 1: Se desea diseñar un sistema de riego por aspersión convencional con los siguientes datos:

$E_{v25\%p}=7.6\text{mm/d}$	$K_p=0.88$	$K_C=0.85$	$h=0.8\text{m}$	$\alpha=0.9\text{g/cm}^3$
$CC=32\%P_{SS}$	$L_p=85\%CC$	$E_{fr}=80\%$	$Q_{asp}=0.008\text{m}^3/\text{s}$	
$V_v=3\text{m/s}$	$R_{ALC}=14\text{m}$	$V_{inf}=30\text{mm/h}$	$H_{ASP}=30\text{mca}$	
$\Delta Z_{lat}=0\text{m}$	$\Delta Z_{dis}=0\text{m}$	$H_{ELE}=1.2\text{m}$	$\varnothing_{lat}=\varnothing_{dist}=0.0798\text{m}$	
$C_{HW}=150$	$hf_{loc}=1\text{mca}$	$L_{lat}=60\text{m}$	$H_{prof}=0.9\text{m}$	$E_{fap}=90\%$
$i_{(v1-A)}=0\%$	$i_{(A-B)}=0\%$	$i_{(B-C)}=0\%$	$i_{(C-D)}=0\%$	
$L_{(Hinic-V1)}=5\text{m}$	$L_{(V1-A)}=10\text{m}$	$L_{(A-B)}=140\text{m}$	$L_{(B-C)}=80\text{m}$	$L_{(C-D)}=10\text{m}$
$\varnothing_{(Hinic-V1)}=0.0798\text{m}$	$\varnothing_{(V1-A)}=0.0798\text{m}$	$\varnothing_{(A-B)}=0.1\text{m}$	$\varnothing_{(B-C)}=0.15\text{m}$	$\varnothing_{(C-D)}=0.3\text{m}$

Respuesta:

Diseño Agronómico:

Necesidades Hídricas

$$N_H = E_{V25\%P} \times K_p \times K_C = 5.685 \text{ mm/d}$$

Dosis de riego neta

$$D_N = 10 \times h \times \alpha \times (CC - LP) = 34.56 \text{ mm/d}$$

Dosis de riego bruta

$$D_B = \frac{D_N}{ER} = 43.2 \text{ mm/d}$$

Frecuencia de riego

$$I_R = \frac{D_N}{ET_C} = 6 \text{ d}$$

Tasa de precipitación del aspersor

$$I_{AP} = \frac{3600 \times Q_{ASP}}{A_{HUM}} \times EA_P = \frac{3600 \times Q_{ASP}}{E_{ASP} \times E_{LAT}} \times EA_P = 12 \text{ mm/h}$$

$$V_{inf} \geq I_{ap} \quad 30 \text{ mm/h} > 12 \text{ mm/h}$$

$$E_{ASP} = R_{ALC} \times k = 12 \text{ m}$$

$$E_{LAT} = 1.73 \times R_{ALC} \times k = 18 \text{ m}$$

$$k = 0.34 \times e^{-0.35 \times V_v} + 0.66 = 0.779$$

Tiempo de aplicación de la dosis de riego

$$T_{AP} = \frac{D_B}{I_{AP}} = 4 \text{ h}$$

Tiempo de riego

$$T_R = T_{AP} + T_C = 4.5 \text{ h}$$

Dosis total o definitiva:

$$Dt = T_{AP} \times I_{ap} = 54 \text{ mm}$$

Diseño Hidráulico:

Diseño de las parcelas de riego:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2*n} + \frac{\sqrt{m-1}}{6*n^2} = 0.44$$

PRESIÓN AL INICIO DEL LATERAL:

$$h_{INI} = H_{ASP} + 0.75 + hf_{LAT} + \frac{\Delta Z_{LAT}}{2} + H_{ELE} = 31.42 \text{ mca}$$

Pérdidas por fricción entre el inicio y final del lateral (mca):

$$hf_{LAT} = 10.67 \times \left(\frac{Q_{LAT}}{C_{HW}} \right)^{1.852} \times \phi_{LAT}^{-4.869} \times F_{LAT} \times L_{LAT} = 0.295 \text{ m}$$

PRESIÓN AL FINAL DEL LATERAL:

$$h_{FIN} = h_{INI} - hf_{LAT} - \Delta Z_{LAT} = 31.126 \text{ mca}$$

VARIACIÓN DE PRESIÓN EN LA DISTRIBUIDORA:

$$\Delta h_{LAT} = |h_{INI} - h_{FIN}| = 0.295 \text{ mca}$$

$$hf_{Dist} = 10.67 \times \left(\frac{Q_{LAT}}{C_{HW}} \right)^{1.852} \times \phi_{Dist}^{-4.869} \times F_{Dist} \times L_{Dist} = 0.806 \text{ m}$$

$$\Delta h_{LAT} = |h_{INI} - h_{FIN}| = 0.295 \text{ mca}$$

$$H_{FIN} = h_{INI} + H_{PROF} + H_{LOC} = 33.321 \text{ mca}$$

$$H_{INI} = H_{FIN} + hf_{FIN-INI} + \Delta Z_{FIN-INI} = 34.127 \text{ mca}$$

$$\Delta H_{DIST} = |H_{INI} - H_{FIN}| = 0.806 \text{ mca}$$

$$\Delta H_{adm} = hf_{lat} + \Delta Z_{lat} + hf_{dist} + \Delta Z_{dist} = 1.101 \text{ mca}$$

$$\Delta H_{adm} \leq 20\% H_{asp} \quad 4.728 \text{ mca} < 6 \text{ mca}$$

Presión en la válvula:

$$H_V = H_{ini} + hf_{(Hini-V)} + \Delta Z_{(Hini-V)} = 34.183 \text{ mca}$$

Presión en la bomba:

$$H_B = H_{V1} + hf_{(V1-B)} + \Delta Z_{(V1-B)} = 36.672 \text{ mca}$$

Caudal en la bomba:

$$Q_B = \Sigma Q_{laterales} = 0.0192 \text{ m}^3/\text{s}$$

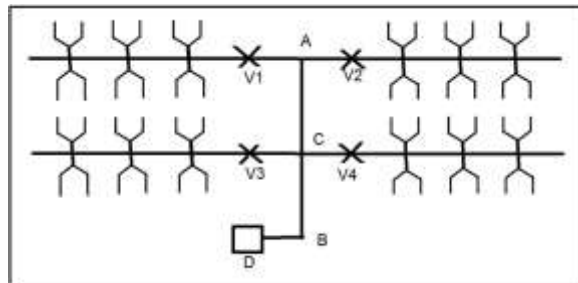


Figura 22: Esquema del diseño, (Creación personal)

Ejercicio 2: Con los datos del eje 1, conociendo además que en el terreno que se encuentra por debajo de la bomba existe un desnivel de entre 1 y 2 % calcule la presión en la bomba para 8 distribuidoras.

$$i_{lat}=2\% \quad i_{dist}=1.5\% \quad i_{(v-Hini)}=1\% \quad i_{(E-F)}=2\% \quad i_{(F-C)}=2\%$$

$$L_{(Hinic-V5)}=5\text{ m} \quad L_{(V5-F)}=10\text{ m} \quad L_{(F-E)}=140\text{ m} \quad L_{(E-C)}=80\text{ m} \quad L_{(C-D)}=10\text{ m}$$

$$\varnothing_{(Hinic-V5)}=0.0798\text{ m} \quad \varnothing_{(V5-F)}=0.0798\text{ m} \quad \varnothing_{(F-E)}=0.1\text{ m} \quad \varnothing_{(E-C)}=0.15\text{ m} \quad \varnothing_{(C-D)}=0.3\text{ m}$$

Respuesta:

Diseño Agronómico:

Necesidades Hídricas

$$N_H = E_{V25\%P} \times K_P \times K_C = 5.685\text{ mm/d}$$

Dosis de riego neta

$$D_N = 10 \times h \times \alpha \times (CC - LP) = 34.56\text{ mm/d}$$

Dosis de riego bruta

$$D_B = \frac{D_N}{ER} = 43.2\text{ mm/d}$$

FRECUENCIA DE RIEGO

$$I_R = \frac{D_N}{ET_C} = 6\text{ d}$$

Tasa de precipitación del aspersor

$$I_{AP} = \frac{3600 \times Q_{ASP}}{A_{HUM}} \times EA_P = \frac{3600 \times Q_{ASP}}{E_{ASP} \times E_{LAT}} \times EA_P = 12\text{ mm/h}$$

$$V_{inf} \geq I_{ap} \quad 30\text{ mm/h} > 12\text{ mm/h}$$

$$E_{ASP} = R_{ALC} \times k = 12\text{ m}$$

$$E_{LAT} = 1.73 \times R_{ALC} \times k = 18\text{ m}$$

$$k = 0.34 \times e^{-0.35 \times V_V} + 0.66 = 0.779$$

Tiempo de aplicación de la dosis de riego

$$T_{AP} = \frac{D_B}{I_{AP}} = 4\text{ h}$$

Tiempo de riego

$$T_R = T_{AP} + T_C = 4.5\text{ h}$$

Dosis total o definitiva:

$$Dt = T_{AP} \times I_{ap} = 54\text{ mm}$$

Diseño Hidráulico CAMPO 1:

Diseño de las parcelas de riego:

Factor para corregir las pérdidas de presión en una tubería

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2 \cdot n} + \frac{\sqrt{m-1}}{6 \cdot n^2} = 0.44$$

PRESIÓN AL INICIO DEL LATERAL:

$$h_{INI} = H_{ASP} + 0.75 + hf_{LAT} + \frac{\Delta Z_{LAT}}{2} + H_{ELE} = 31.42\text{ mca}$$

Pérdidas por fricción entre el inicio y final del lateral (mca):

$$hf_{LAT} = 10.67 \times \left(\frac{Q_{LAT}}{C_{HW}} \right)^{1.852} \times \phi_{LAT}^{-4.869} \times F_{LAT} \times L_{LAT} = 0.295 \text{ m}$$

PRESIÓN AL FINAL DEL LATERAL:

$$h_{FIN} = h_{INI} - hf_{LAT} - \Delta Z_{LAT} = 31.126 \text{ mca}$$

VARIACIÓN DE PRESIÓN EN LA DISTRIBUIDORA:

$$\Delta h_{LAT} = |h_{INI} - h_{FIN}| = 0.295 \text{ mca}$$

$$hf_{Dist} = 10.67 \times \left(\frac{Q_{LAT}}{C_{HW}} \right)^{1.852} \times \phi_{Dist}^{-4.869} \times F_{Dist} \times L_{Dist} = 0.806 \text{ m}$$

$$\Delta h_{LAT} = |h_{INI} - h_{FIN}| = 0.295 \text{ mca}$$

$$H_{FIN} = h_{INI} + H_{PROF} + H_{LOC} = 33.321 \text{ mca}$$

$$H_{INI} = H_{FIN} + hf_{FIN-INI} + \Delta Z_{FIN-INI} = 34.127 \text{ mca}$$

$$\Delta H_{DIST} = |H_{INI} - H_{FIN}| = 0.806 \text{ mca}$$

$$\Delta H_{adm} = hf_{lat} + \Delta Z_{lat} + hf_{dist} + \Delta Z_{dist} = 1.101 \text{ mca}$$

$$\Delta H_{adm} \leq 20\% H_{asp} \quad 4.728 \text{ mca} < 6 \text{ mca}$$

Presión en la válvula:

$$H_V = H_{ini} + hf_{(Hini-V)} + \Delta Z_{(Hini-V)} = 34.183 \text{ mca}$$

Presión en la bomba:

$$H_B = H_{V1} + hf_{(V1-B)} + \Delta Z_{(V1-B)} = 36.672 \text{ mca}$$

Caudal en la bomba:

$$Q_B = \Sigma Q_{laterales} = 0.0192 \text{ m}^3/\text{s}$$

Diseño Hidráulico Campo 2:

Diseño de las parcelas de riego:

Factor para corregir las pérdidas de presión en una tubería

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2*n} + \frac{\sqrt{m-1}}{6*n^2} = 0.44$$

PRESIÓN AL INICIO DEL LATERAL:

$$h_{INI} = H_{ASP} + 0.75 + hf_{LAT} + \frac{\Delta Z_{LAT}}{2} + H_{ELE} = 31.87 \text{ mca}$$

Pérdidas por fricción entre el inicio y final del lateral (mca):

$$hf_{LAT} = 10.67 * \left(\frac{Q_{LAT}}{C_{HW}} \right)^{1.852} * \phi_{LAT}^{-4.869} * F_{LAT} * L_{LAT} = 0.295 \text{ m}$$

PRESIÓN AL FINAL DEL LATERAL:

$$h_{FIN} = h_{INI} - hf_{LAT} - \Delta Z_{LAT} = 30.676 \text{ mca}$$

VARIACIÓN DE PRESIÓN EN LA DISTRIBUIDORA:

$$hf_{Dist} = 10.67 * \left(\frac{Q_{LAT}}{C_{HW}} \right)^{1.852} * \phi_{Dist}^{-4.869} * F_{Dist} * L_{Dist} = 0.806 \text{ m}$$

$$\Delta h_{LAT} = |h_{INI} - h_{FIN}| = 1.195 \text{ mca}$$

$$H_{FIN} = h_{INI} + H_{PROF} + H_{LOC} = 33.771 \text{ mca}$$

$$H_{INI} = H_{FIN} + Hf_{FIN-INI} + \Delta Z_{FIN-INI} = 36.017 \text{ mca}$$

$$\Delta H_{DIST} = |H_{INI} - H_{FIN}| = 2.246 \text{ mca}$$

$$\Delta H_{adm} = hf_{lat} + \Delta Z_{lat} + hf_{dist} + \Delta Z_{dist} = 3.441 \text{ mca}$$

$$\Delta H_{adm} \leq 20\% H_{asp} \quad 3.441 \text{ mca} < 6 \text{ mca}$$

Presión en la válvula:

$$H_V = H_{ini} + hf_{(Hini-V)} + \Delta Z_{(Hini-V)} = 38.615 \text{ mca}$$

Presión en la bomba:

$$H_B = H_{V1} + hf_{(V1-B)} + \Delta Z_{(V1-B)} = 45.613 \text{ mca}$$

Caudal en la bomba:

$$Q_B = \Sigma Q_{laterales} = 0.0384 \text{ m}^3/\text{s}$$

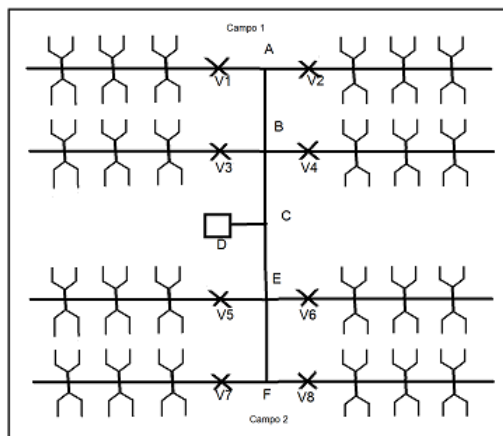


Figura 23: Esquema del diseño, (Creación personal)

Ejercicio 3: Se desea diseñar un sistema de riego por pivote central para lo que se cuenta con los datos siguientes:

A= 49 ha	$E_{v25\%p}=7 \text{ mm/d}$	$K_p=0.79$	$KC= 0.8$	$P_{rad}=70 \text{ cm}$
Tod=20 h	$E_f=90 \%$	$H_{ASP}= 15 \text{ mca}$		
$h_{pivote}=4 \text{ m}$	$R_{asp}=6 \text{ m}$	$CA=1\text{mm/cm}$	$\%AU=40\%$	
Sep/torres=35 m	$i_{pivote}=0 \%$	$H_{ELE}=m$	$E_{fap}=90 \%$	$Alm.Sup=7.6\text{mm}$
$C_{HW}=150$	$\varnothing_{pivote}=0.18 \text{ m}$	$L_{lat}=m$	$H_{prof}=m$	$V_{m\acute{a}x}=1.9 \text{ m/s}$
$L_{(HP-V1)} = 5 \text{ m}$	$L_{(V1-A)} = 355 \text{ m}$	$L_{(A-B)} = 360 \text{ m}$	$L_{(B-C)} = 10 \text{ m}$	
$\varnothing_{(V1-A)} = 0.18 \text{ m}$	$\varnothing_{(A-B)} = 0.22 \text{ m}$	$\varnothing_{(B-C)} = 0.3 \text{ m}$		

Diseño agronómico

Calculo de la longitud del pivote:

$$L = \sqrt{A} = 700 \text{ m}$$

Radio del pivote:

$$R = \frac{L}{2} = 350 \text{ m}$$

Número de torres:

$$\#_{torres} = \frac{R}{Sep/torr} = 10 \text{ torres}$$

Radio hasta la última torre:

$$R_{ul} = \#_{torres} \times sep/torr = 350 \text{ m}$$

Radio de la superficie regada:

$$R_{SR} = R_{ul} + dist. hasta asp = 350 \text{ m}$$

Área de la superficie regada:

$$A_{SR} = \pi \times R_{SR}^2 = 38.465 \text{ ha}$$

Necesidades hídricas:

$$N_H = E_{V_{25\%p}} \times K_P \times K_C = 4.424 \text{ mm/d}$$

Caudal del pivote:

$$Q_p = \frac{N_H \times A_{SR} \times 10000}{E_{fap} \times T_{op} \times 3600} = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tiempo mínimo para que el pivote complete una vuelta:

$$T_{mín} = \frac{2\pi \times R_{ul}}{V_{máx}} = 19 \text{ h}$$

Tiempo máximo para que el pivote complete una vuelta:

$$T_{máx} = \frac{2\pi \times R_{UT}}{V_{mín}} = 77 \text{ h}$$

Tiempo máximo que utiliza el pivote en mojar un punto:

Se determinó por medio del ábaco de la Figura 24

$$T_M = 25.27 \text{ min.}$$

Pluviometría máxima:

$$P_M = \frac{28800}{\pi} \times \frac{Q_p}{A_M \times R_{SR}} = 57.348 \text{ mm/h}$$

Anchura mojada

$$A_M = 2 \times R_{asp} = 12 \text{ m}$$

Velocidad mínima

$$V_{mín} = \frac{A_M}{T_M} = 0.475 \text{ m/min}$$

Dosis bruta máxima:

$$D_{B_{máx}} = 0.36 \times \frac{Q_P \times T_{máx}}{A_{sr}} = 18.925 \text{ mm}$$

Dosis bruta mínima:

$$D_{B_{mín}} = 0.36 \times \frac{Q_P \times T_{mín}}{A_{sr}} = 4.67 \text{ mm}$$

Dosis neta máxima:

$$D_{N_{máx}} = D_{B_{máx}} \times E_{fr} = 17.032 \text{ mm}$$

Dosis neta mínima:

$$D_{N_{\min}} = D_{B_{\min}} \times E_{f_r} = 4.023 \text{ mm}$$

Intervalo de riego máximo:

$$I_{R_{\max}} = \frac{D_{N_{\max}}}{N_H} = 4 \text{ d}$$

Intervalo de riego mínimo:

$$I_{R_{\min}} = \frac{D_{N_{\min}}}{N_H} = 1 \text{ d}$$

Intervalo de riego real:

$$I_{R_R} = 3 \text{ d}$$

Dosis de riego neta real:

$$D_{R_{NR}} = I_{R_R} \times N_H = 13.272 \text{ mm}$$

Dosis bruta real:

$$D_{B_R} = \frac{D_{R_{NR}}}{E_{f_R}} = 14.747 \text{ mm}$$

Tiempo de riego real:

$$T_{R_R} = \frac{D_{B_R} \times A_{SR}}{0.36 \times Q_P} = 60 \text{ h}$$

Diseño Hidráulico:

Presión del pivote:

$$H_P = H_{asp} + h_p + \Delta Z_P + hf_P = 19.945 \text{ mca}$$

Perdidas de energía en el pivote:

$$hf_P = 10.67 \times \left(\frac{Q_P}{C_{HW}} \right)^{1.852} \times \phi_P^{-4.869} \times L_P \times 0.543 = 0.945 \text{ m}$$

Presión en la válvula:

$$H_V = H_P + hf_{(HP-V)} + \Delta Z_{(HP-V)} = 19.99 \text{ mca}$$

Presión en la bomba:

$$H_B = H_{V1} + hf_{(V1-B)} + \Delta Z_{(-B)} = 22 \text{ mca}$$

Caudal en la bomba:

$$Q_B = \Sigma Q_{laterales} = 0.052 \text{ m}^3/\text{s}$$

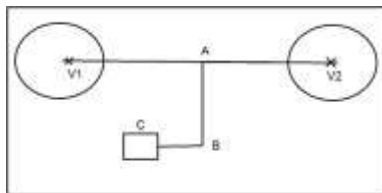


Figura 25: Esquema del diseño, (Creación personal)

Ejercicio 4: Con los datos del eje 3, conociendo además que en el terreno que se encuentra por debajo de la bomba existe un desnivel de entre 1 y 2 % calcule la presión en la bomba para 4 pivotes.

$$L_{(HP-V1)} = 5 \text{ m} \quad L_{(V3-D)} = 355 \text{ m} \quad L_{(D-B)} = 360 \text{ m} \quad L_{(B-C)} = 10 \text{ m}$$

$$\varnothing_{(Hinic-V1)} = 0.18 \text{ m} \quad \varnothing_{(V3-D)} = 0.18 \text{ m} \quad \varnothing_{(D-B)} = 0.22 \text{ m} \quad \varnothing_{(B-C)} = 0.3 \text{ m}$$

$$I_{pivote} = 1 \% \quad i_{(V3-D)} = 1 \% \quad i_{(D-B)} = 1 \% \quad i_{(B-C)} = 0 \%$$

Diseño agronómico

Calculo de la longitud del pivote:

$$L = \sqrt{A} = 700 \text{ m}$$

Radio del pivote:

$$R = \frac{L}{2} = 350 \text{ m}$$

Número de torres:

$$\#_{torres} = \frac{R}{sep/torr} = 10 \text{ torres}$$

Radio hasta la última torre:

$$R_{ul} = \#_{torres} \times sep/torr = 350 \text{ m}$$

Radio de la superficie regada:

$$R_{SR} = R_{ul} + dist. hasta asp = 350 \text{ m}$$

Área de la superficie regada:

$$A_{SR} = \pi \times R_{SR}^2 = 38.465 \text{ ha}$$

Necesidades hídricas:

$$N_H = E_{V_{25\%p}} \times K_P \times K_C = 4.424 \text{ mm/d}$$

Caudal del pivote:

$$Q_p = \frac{N_H \times A_{SR} \times 10000}{E_{fap} \times T_{op} \times 3600} = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tiempo mínimo para que el pivote complete una vuelta:

$$T_{mín} = \frac{2\pi \times R_{ul}}{V_{máx}} = 19 \text{ h}$$

Tiempo máximo para que el pivote complete una vuelta:

$$T_{máx} = \frac{2\pi \times R_{UT}}{V_{mín}} = 77 \text{ h}$$

Tiempo máximo que utiliza el pivote en mojar un punto:

Mediante ábaco para la determinación del tiempo máximo empleado por el equipo en pasar por un punto del extremo para que no haya escorrentía de la Figura 26 se obtuvo un $T_M = 25.27 \text{ min}$.

Pluviometría máxima:

$$P_M = \frac{28800}{\pi} \times \frac{Q_p}{A_M \times R_{SR}} = 57.348 \text{ mm/h}$$

Anchura mojada

$$A_M = 2 \times R_{asp} = 12 \text{ m}$$

Velocidad mínima

$$V_{mín} = \frac{A_M}{T_M} = 0.475 \text{ m/min}$$

Dosis bruta máxima:

$$D_{B_{máx}} = 0.36 \times \frac{Q_P \times T_{máx}}{A_{sr}} = 18.925 \text{ mm}$$

Dosis bruta mínima:

$$D_{B_{mín}} = 0.36 \times \frac{Q_P \times T_{mín}}{A_{sr}} = 4.67 \text{ mm}$$

Dosis neta máxima:

$$D_{N_{máx}} = D_{B_{máx}} \times E_{fr} = 17.032 \text{ mm}$$

Dosis neta mínima:

$$D_{N_{mín}} = D_{B_{mín}} \times E_{fr} = 4.023 \text{ mm}$$

Intervalo de riego máximo:

$$I_{R_{máx}} = \frac{D_{N_{máx}}}{N_H} = 4 \text{ d}$$

Intervalo de riego mínimo:

$$I_{R_{mín}} = \frac{D_{N_{mín}}}{N_H} = 1 \text{ d}$$

Intervalo de riego real:

$$I_{RR} = 3 \text{ d}$$

Dosis de riego neta real:

$$D_{R_{NR}} = I_{RR} \times N_H = 13.272 \text{ mm}$$

Dosis bruta real:

$$D_{B_R} = \frac{D_{R_{NR}}}{E_{fr}} = 14.747 \text{ mm}$$

Tiempo de riego real:

$$T_{RR} = \frac{D_{B_R} \times A_{SR}}{0.36 \times Q_P} = 60 \text{ h}$$

Diseño Hidráulico:

Presión del pivote:

$$H_P = H_{asp} + h_P + \Delta Z_P + hf_P = 23.445 \text{ mca}$$

Perdidas de energía en el pivote:

$$hf_P = 10.67 \times \left(\frac{Q_P}{C_{HW}} \right)^{1.852} \times \phi_P^{-4.869} \times L_P \times 0.543 = 0.945 \text{ m}$$

Presión en la válvula:

$$H_V = H_P + hf_{(HP-V)} + \Delta Z_{(HP-V)} = 23.59 \text{ mca}$$

Presión en la bomba:

$$H_{B(\text{desde campo 2})} = H_{V1} + hf_{(V1-B)} + \Delta Z_{(-B)} = 32.748 \text{ mca}$$

$$H_{B(\text{desde campo 1})} = H_{V1} + hf_{(V1-B)} + \Delta Z_{(-B)} = 22.02 \text{ mca}$$

Caudal en la bomba:

$$Q_B = \Sigma Q_{\text{laterales}} = 0.104 \text{ m}^3/\text{s}$$

Debido la diferencia de presión de 10.728 mca existente entre ambos campos se hace necesario la implementación de un regulador de presión para compensar la misma.

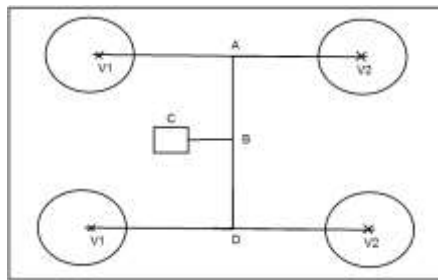


Figura 27: Esquema del diseño, (Creación personal)

Ejercicio 5: Se desea diseñar un sistema de riego por aspersión mecanizada mediante un Enrollador para el cual se cuenta con los datos siguientes:

A= 18,513 ha	$E_{V25\%p} = 7.35 \text{ mm/d}$	$K_p = 0.85$	$KC = 1.12$	$P_{rad} = 70 \text{ cm}$
Tod= h	$\% \phi_{moj} = 70 \%$	$DTH = 50\% AU$	$E_{fap} = 65\%$	$V_{inf} = 25.4 \text{ mm/h}$
$Q_{asp} = \text{m}^3/\text{s}$	$h_{pivote} = 4 \text{ m}$	$CA = 1 \text{ mm/cm}$	$hf_{loc} = 10 \text{ mca}$	
$T_{Camb} = 1 \text{ h}$	$i_{pivote} = \%$	$\alpha = 220^\circ$	$V_v = 2.5 \text{ m/s}$	
$I_E = 0 \%$				

$L_{(H-V1)} = 50 \text{ m}$	$L_{(V1-A)} = 10 \text{ m}$	$L_{(A-B)} = 380 \text{ m}$	$L_{(B-C)} = 195 \text{ m}$	$L_{(C-D)} = 10 \text{ m}$
$\phi_{(H-V1)} = 0.11 \text{ m}$	$\phi_{(V1-A)} = 0.11 \text{ m}$	$\phi_{(A-B)} = 0.2 \text{ m}$	$\phi_{(B-C)} = 0.4 \text{ m}$	$\phi_{(C-D)} = 0.8 \text{ m}$

Diseño Agronómico:

Dosis Neta:

$$D_N = CA \times P_{rad} \times DTH = 35 \text{ mm}$$

Dosis Bruta:

$$D_B = \frac{D_N}{E_{fap}} = 53.846 \text{ mm}$$

Necesidades hídricas:

$$N_H = E_{V25\%p} \times K_p \times K_c = 6.997 \text{ mm/d}$$

Intervalo de riego máximo:

$$I_{R_{\text{máx}}} = \frac{D_N}{N_H} = 6 \text{ d}$$

Dosis neta real:

$$D_{NR} = I_R \times N_H = 41.983 \text{ mm}$$

Dosis bruta real:

$$D_{BR} = \frac{D_{NR}}{E_{fap}} = 64.59 \text{ mm}$$

Caudal medio de bombeo:

$$Q = \frac{N_H \times A \times 10000}{E_{fap} \times T_{od} \times 3600} = 27.679 \text{ L/s}$$

Tras la obtención del caudal se procede a elegir el aspersor conveniente para el sistema de riego mediante a catálogo.

Tabla 25:Datos del Catálogo.

Q _E =	101	m ³ /h
R=	58	m
Ø _b =	34	mm
L=	200	m
Ø _{mang} =	110	mm
H=	50,4	mca
henrroll=	3,15	m

Intensidad de aplicación o pluviometría del aspersor:

$$I_{ap} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \times (90\% R_{asp})^2 \times \frac{\pi}{360}} = 19.317 \text{ mm/h}$$

ancho de la parcela =374 m

largo de la parcela =495 m

Separación entre bandas de riego:

Espaciamiento entre bandas:

$$E = 2 * R_{asp} \times \% \phi_{Moj} = 81.2 \text{ m}$$

Número de bandas:

$$\#_{band} = \frac{L}{E} = 6$$

Ancho de la banda:

$$a_b = \frac{L}{\#_{band}} = 82.5 \text{ m}$$

Espaciamiento (% de diámetro mojado):

$$E = 2 \times R_{asp} \times \% \phi_{Moj} = 82.5 \text{ m}$$

R_{asp} → Radio de alcance del aspersor (m).

$$\% \phi_{moj} = \frac{a_b}{2 \times R_{asp}} = 71.121 \%$$

Velocidad de avance por aspersor:

$$V_{av} = \frac{Q}{D_{BR} \times E} = 18.7 \text{ m/h}$$

Tiempo sin avance al inicio de la parcela:

$$T_i = \frac{2}{3} \times \frac{\phi}{360^\circ} \times \frac{R_{asp}}{V_{av}} = 1 \text{ h}$$

Tiempo sin avance al final de la parcela:

$$T_f = \frac{2}{3} \times \left(1 - \frac{\phi}{360^\circ}\right) \times \frac{R}{V_{av}} = 1 \text{ h}$$

Longitud de la manguera:

$$L_{mang} = \frac{a_p}{2} - D_{ip} = 148.33 \text{ m}$$

Diámetro al inicio de la parcela:

$$D_i = \frac{2}{3} \times R_{asp} = 38.667 \text{ m}$$

Tiempo de avance:

$$T_{AV} = \frac{L_{mang}}{V_{AV}} = 8 \text{ h}$$

Diseño Hidráulico:

Perdidas de energía en la manguera:

$$h_{f_{mang}} = 4.093 \times 10^{-3} \times K_s \times Q_E^{1.9} \times \phi^{-4.9} \times L = 0.185 \text{ mca}$$

Presión en el hidrante.

$$H_{HIDRANTE} = H_E + h_{enrollador} + hf_{(H1-V)} + hf_{loc} = 66.631 \text{ mca}$$

Presión en la válvula:

$$H_V = H_{HIDRANTE} + hf_{(H1-V)} + \Delta Z_{(H1-V)} = 67.247 \text{ mca}$$

Presión en la bomba:

$$H_B = H_V + hf_{(V1-B)} + \Delta Z_{(-B)} = 72.753 \text{ mca}$$

Caudal en la bomba:

$$Q_B = \Sigma Q_{laterales} = 0.112 \text{ m}^3/\text{s}$$

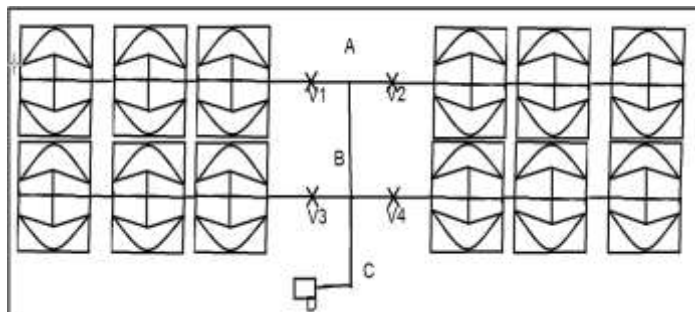


Figura 28:Esquema del diseño , (Creación personal)

Ejercicio 6: Con los datos del eje 5, conociendo además que en el terreno que se encuentra por debajo de la bomba existe un desnivel de entre 1 y 2 % calcule la presión en la bomba para 8 Enrolladores.

$$\begin{aligned} \Delta Z_{(H1-V)} &= 0.5 \text{ m} & i_{(V7-F)} &= 1 \% & i_{(F-E)} &= 1 \% & i_{(E-C)} &= 1 \% & i_{(C-D)} &= 0 \% \\ L_{(H-V7)} &= 50 \text{ m} & L_{(V7-F)} &= 10 \text{ m} & L_{(F-E)} &= 380 \text{ m} & L_{(E-C)} &= 195 \text{ m} & L_{(C-D)} &= 10 \text{ m} \\ \varnothing_{(H-V7)} &= 0.11 \text{ m} & \varnothing_{(V5-F)} &= 0.11 \text{ m} & \varnothing_{(F-E)} &= 0.2 \text{ m} & \varnothing_{(E-C)} &= 0.4 \text{ m} & \varnothing_{(C-D)} &= 0.8 \end{aligned}$$

Diseño Agronómico:

Dosis Neta:

$$D_N = CA * P_{rad} * DTH = 35 \text{ mm}$$

Dosis Bruta:

$$D_B = \frac{D_N}{E_{fap}} = 53.846 \text{ mm}$$

Necesidades hídricas:

$$N_H = E_{V_{25\%p}} \times K_p \times K_c = 6.997 \text{ mm/d}$$

Intervalo de riego máximo:

$$I_{R_{m\acute{a}x}} = \frac{D_N}{N_H} = 6 \text{ d}$$

Dosis neta real:

$$D_{N_R} = I_R \times N_H = 41.983 \text{ mm}$$

Dosis bruta real:

$$D_{B_R} = \frac{D_{N_R}}{E_{fap}} = 64.59 \text{ mm}$$

Caudal medio de bombeo:

$$Q = \frac{N_H \times A \times 10000}{E_{fap} \times T_{od} \times 3600} = 27.679 \text{ L/s}$$

Tras la obtención del caudal se procede a elegir el aspensor conveniente para el sistema de riego mediante a catálogo.

Tabla 26: Datos del Catálogo.

$Q_E =$	101	m ³ /h
$R =$	58	m
$\varnothing_b =$	34	mm
$L =$	200	m
$\varnothing_{mang} =$	110	mm
$H =$	50,4	mca
henrroll=	3,15	m

Intensidad de aplicación o pluviometría del aspersor:

$$I_{ap} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \times (90\% R_{asp})^2 \times \frac{4}{360^\circ}} = 19.317 \text{ mm/h}$$

ancho de la parcela = 374 m

largo de la parcela = 495 m

Separación entre bandas de riego:

Espaciamiento entre bandas:

$$E = 2 \times R_{asp} \times \% \phi_{Moj} = 81.2 \text{ m}$$

Número de bandas:

$$\#_{band} = \frac{L}{E} = 6$$

Ancho de la banda:

$$a_b = \frac{L}{\#_{band}} = 82.5 \text{ m}$$

Espaciamiento (% de diámetro mojado):

$$E = 2 \times R_{asp} \times \% \phi_{Moj} = 82.5 \text{ m}$$

$R_{asp} \rightarrow$ Radio de alcance del aspersor (m).

$$\% \phi_{moj} = \frac{a_b}{2 \times R_{asp}} = 71.121 \%$$

Velocidad de avance por aspersor:

$$V_{av} = \frac{Q}{D_{BR} \times E} = 18.7 \text{ m/h}$$

Tiempo sin avance al inicio de la parcela:

$$T_i = \frac{2}{3} \times \frac{4}{360^\circ} \times \frac{R_{asp}}{V_{av}} = 1 \text{ h}$$

Tiempo sin avance al final de la parcela:

$$T_f = \frac{2}{3} \times \left(1 - \frac{4}{360^\circ}\right) \times \frac{R}{V_{av}} = 1 \text{ h}$$

Longitud de la manguera:

$$L_{mang} = \frac{a_p}{2} - D_{ip} = 148.33 \text{ m}$$

Diámetro al inicio de la parcela:

$$D_i = \frac{2}{3} \times R_{asp} = 38.667 \text{ m}$$

Tiempo de avance:

$$T_{AV} = \frac{L_{mang}}{V_{AV}} = 8 \text{ h}$$

Diseño Hidráulico:

Perdidas de energía en la manguera:

$$h_{f_{man}} = 4.093 \times 10^{-3} \times K_s \times Q_E^{1.9} \times \phi^{-4.9} \times L = 0.185 \text{ mca}$$

Presión en el hidrante.

$$H_{HIDRANTE} = H_E + h_{enrollador} + hf_{(H1-V)} + hf_{loc} = 66.631 \text{ mca}$$

Presión en la válvula:

$$H_V = H_{HIDRANTE} + hf_{(H1-V)} + \Delta Z_{(H1-V)} = 70.212 \text{ mca}$$

Presión en la bomba:

$$H_{B(campo 2)} = H_V + hf_{(V1-B)} + \Delta Z_{(-B)} = 81.485 \text{ mca}$$

$$H_{B(campo 1)} = H_V + hf_{(V1-B)} + \Delta Z_{(-B)} = 72.77 \text{ mca}$$

Caudal en la bomba:

$$Q_B = \Sigma Q_{laterales} = 0.224 \text{ m}^3/\text{s}$$

Debido la diferencia de presión de 8.715 mca existente entre ambos campos se hace necesario la implementación de un regulador de presión para compensar la misma.

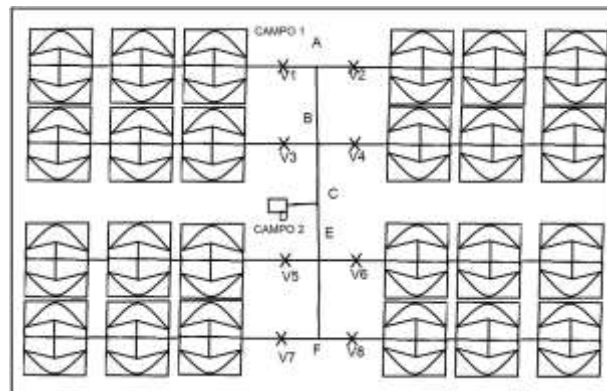


Figura 29: Esquema del diseño , (Creación personal)

Ejercicio 7: Se desea diseñar un sistema de riego localizado por microaspersión con emisores no autocompensantes con los datos siguientes:

$Q_e = 41.05 \text{ L/h}$ $EV_{25\%P} = 8.1 \text{ mm/d}$ $K_p = 1$ $K_b = 0.77$ $K_a = 1$ $Sp = 4 \text{ m}$ $D_c = 5.6 \text{ m}$

$Si = 8 \text{ m}$ $CU = 90 \%$ $LP = 90\&CC$ $Nep = 1$ $E_{fap} = 95 \%$ $CE_{ar} = 0.8$ $CE_{es} = 2.3$

$h = 0.65 \text{ m}$ $Re = 2.36 \text{ m}$ $\alpha = 1.04$ $CC = 51.2 \%$ P_{ss} $I_{rasumido} = 1 \text{ d}$

$He = 10.53 \text{ mca}$ $L_{lat} = 100 \text{ m}$ $\phi_{lat} = 20.8 \text{ mm}$ $K = 10.83$ $x = 0.4884$ $C_v = 1.13 \%$

$\phi_{dist} = 20.8 \text{ mm}$ $L_{(V1-A)} = 5 \text{ m}$ $L_{(A-C)} = 10 \text{ m}$ $L_{(C-D)} = 10 \text{ m}$ $L_{(C-B)} = 50 \text{ m}$ $\phi_{(V1-A)} = 0.08 \text{ m}$

$\phi_{(A-C)} = 0.1 \text{ m}$ $\phi_{(C-B)} = 0.16 \text{ m}$

Procedimiento para el Diseño agronómico:

Calculo de las necesidades neta hídricas puntas:

$$N_H = E_{V_{10\%p}} \times K_p \times K_b \times K_l \times K_a = 4.99 \text{ mm/d}$$

Calculo del coeficiente debido a la localización:

$$K_l = P_c + 0.1 = \frac{A_c}{A_{mp}} + 0.1 = 0.8$$

Calculo del área de la proyección vertical de la copa del árbol:

$$A_c = S_p \times D_c = 22.4 \text{ m}^2$$

Calculo de las Necesidades Totales.

$$N_t = \frac{N_H}{C_u \times (1-K)} = 6.68 \text{ mm/d} = 213.76L$$

$$K = 1 - E_{fap} = 0.05$$

Calculo de las Necesidades de lavado:

$$L_R = \frac{CE_{ar}}{2 \times CE_{es}} = 0.17$$

Calculo del Porcentaje que representa el Ah_R respecto al A_c .

$$PH_R = \left(\frac{Ah_r}{A_c} \right) \times 100 = 94.469 \%$$

Calculo del área de humedecimiento real:

$$Ah_R = A_e \times N_e = 21.16 \text{ m}^2$$

Determinación del área mojada por un emisor:

$$A_e = \pi \times (R_e \times 1.1)^2 = 21.16 \text{ m}^2$$

Calculo de la Capacidad de Almacenamiento:

$$M_N = 10 \times h \times \alpha \times (CC - LP) = 27.69 \text{ mm}$$

Tiempo de riego:

$$T_R = \frac{N_{ds} \times N_t \times IR}{N_{dr} \times Q_p} = 6.07h = 6.15h$$

Gasto instalado por planta:

$$Q_p = Q_e \times N_e = 41.05 \text{ L/h}$$

Dosis total definitiva:

$$D_T = \frac{T_{R_{ajust}} \times N_{dr} \times Q_p}{N_{ds} \times I_{R_{ajust}}} = 216.4L \geq 213.76L$$

Otra restricción del diseño agronómico establece que:

$$D_T \geq N_t$$

Diseño Hidráulico:

Emisor No Autocompensante:

Tolerancia de caudales:

$$CU = 1 - \left[\left(\frac{1.27 \times C_V}{e^{0.5}} \right) \right] \times \frac{Q_{\min}}{Q_{\text{med}}}$$

$$Q_{\text{med}} = K \times H^{0.4884} = 41.042 \text{ L/h}$$

$$Q_{\min} = \frac{(CU \times Q_{\text{med}})}{\left[1 - \left(\frac{1.27 \times C_V}{e^{0.5}} \right) \right]} = 37.48 \text{ L/h}$$

Tolerancia de presiones:

$$H_{\min} = \left(\frac{Q_{\min}}{K} \right)^{\frac{1}{x}} = 12.702 \text{ mca}$$

$H_{\min} \rightarrow$ Presión media (mca).

Presión al inicio del lateral:

$$h_0 = H_e + (0.77 \times hf_{lat}) + \frac{\Delta Z_{lat}}{2} = 16.773 \text{ mca}$$

Pérdidas de carga en el lateral:

$$hf_{lat} = J \times F \times L_{lat} = 1.913 \text{ m}$$

Coeficiente de pérdidas por salidas múltiples:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2n} + \frac{\sqrt{m-1}}{6 \times n^2} = 0.37$$

Pérdidas por rozamiento hidráulico:

$$J = 0.473 \times \phi^{-4.75} \times Q_{lat}^{1.75} = 0.052$$

Gradiente Hidráulico:

$$J' = J \times \left(\frac{S_e + L_e}{S_e} \right) = 0.22$$

Caudal del lateral.

Separación entre emisores de un mismo lateral:

$$S_e = R_e \times \left(2 - \frac{a}{100} \right) = 4.248 \text{ m}$$

Longitud equivalente de la conexión de un emisor:

$$L_e = 18.91 \times \phi^{-1.87} = 356.38 \text{ m}$$

$$Q_{lat} = Q_e \times N_{elat} = 1067.1 \text{ L/h}$$

Caudal del emisor.

$$Q_e = K \times H_e^x = 41.02 \text{ L/h}$$

Presión mínima en el lateral.

$$h_{\min} = h_0 - hf_{lat} - \Delta Z_{lat} = 14.86 \text{ mca}$$

$$5\text{mca} \leq h_{\min} \leq 30\text{mca}$$

Variación de presión en el lateral.

$$\Delta h_{lat} = h_0 - h_{\min} = 1.913 \text{ mca}$$

$$5\text{mca} \leq \Delta h_{lat} \leq 30\text{mca}$$

Para continuar con el diseño hidráulico debe conformarse una tabla que contenga las siguientes variables:

Tramo	Q_T (L/s)	$\varnothing_T$ (mm)	V_T (m/s)	L_T (m)	J (m/m)	ΔZ_T (m)	hf_T (mca)	H_i (mca)	$H_{0\text{tramo}}$ (mca)
1_2	2,668	59,2	0,00970	8	0,0168	-0,16	0,1345		15,736
2_3	2,371	59,2	0,00862	8	0,0137	-0,16	0,1094	-0,2945	15,441
3_4	2,075	59,2	0,00754	8	0,0108	-0,16	0,0866	-0,3451	15,391
4_5	1,778	46,4	0,01052	8	0,0263	-0,16	0,2104	-0,8106	14,925
5_6	1,482	46,4	0,00877	8	0,0191	-0,16	0,1529	-1,1810	14,555
6_7	1,186	46,4	0,00702	8	0,0129	-0,16	0,1035	-1,4940	14,242
7_8	0,889	36,4	0,00855	8	0,0248	-0,16	0,1982	-1,7575	13,978
8_9	0,593	36,4	0,00570	8	0,0122	-0,16	0,0975	-2,1156	13,620
10	0,296	36,4	0,00285	8	0,0036	-0,16	0,0290	-2,3731	13,363
Σ	13,339			72		-1,44	1,1221	-10,3713	

Presión al inicio de la distribuidora:

$$\frac{\Sigma H_i}{\#_{lat}} = h_0$$

$$H_0 = 15.736 \text{ mca}$$

$$5\text{mca} \leq H_0 \leq 30\text{mca}$$

Presión mínima en la distribuidora:

Es la presión mínima ($H_{\text{míndist}}$) de la tabla:

$$H_{\text{míndist}} = 13.363 \text{ mca}$$

$$5\text{mca} \leq H_{\text{míndist}} \leq 30\text{mca}$$

Presión mínima en la parcela:

$$H_{\text{mínPR}} = H_{\text{míndist}} - \Delta h_{lat} = 11.45 \text{ mca}$$

$$5\text{mca} \leq H_{\text{mínPR}} \leq 30\text{mca}$$

Caudal en la válvula:

$$Q_V = 1067.1 \text{ L/h}$$

Presión en la válvula:

$$H_V = H_{ini} + hf_{(Hini-v)} + \Delta Z_{(Hini-v)} = 14.199 \text{ mca}$$

Presión en la bomba:

$$H_B = H_{V1} + hf_{(V1-B)} + \Delta Z_{(V1-B)} = 20.812 \text{ mca}$$

Caudal en la bomba:

$$Q_B = \Sigma Q_{lats} = 4268.4 \text{ L/h}$$

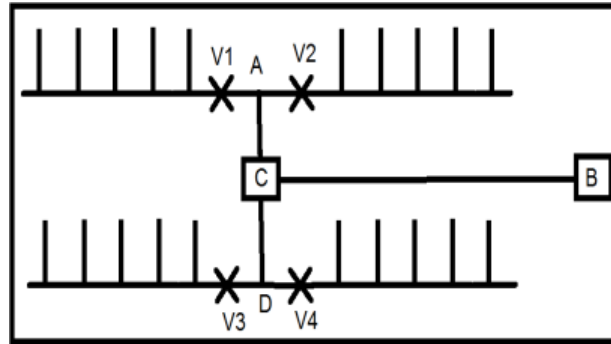


Figura 30:Esquema del diseño , (Creación personal)

Ejercicio 8: Se desea diseñar un sistema de riego localizado por goteo con emisores no autocompensantes con los datos siguientes:

$Q_e = 4 \text{ L/h}$ $EV_{25\%P} = 8.1 \text{ mm/d}$ $K_P = 1$ $K_b = 0.77$ $K_a = 1$ $S_p = 4 \text{ m}$ $D_c = 5.6 \text{ m}$

$S_i = 6 \text{ m}$ $CU = 90 \%$ $LP = 92 \&CC$ $Nep = 1$ $E_{fap} = 95 \%$ $CE_{ar} = 0.8$ $CE_{es} = 2.3$

$h = 1.1 \text{ m}$ $Re = 0.86 \text{ m}$ $CC = 51.2 \%$ P_{ss} $I_{rasumido} = 1 \text{ d}$ $PH_{\min} = 33 \%$

$He = 15 \text{ mca}$ $L_{lat} = 100 \text{ m}$ $\phi_{lat} = 15 \text{ mm}$ $K = 10.83$ $x = 0.4884$ $C_v = 1.13 \%$

$\phi_{dist} = 0.015 \text{ mm}$ $L_{(V1-A)} = 5 \text{ m}$ $L_{(A-C)} = 10 \text{ m}$ $L_{(C-D)} = 10 \text{ m}$ $L_{(C-B)} = 50 \text{ m}$ $\phi_{(V1-A)} = 0.015 \text{ m}$

$\phi_{(A-C)} = 0.02 \text{ m}$ $\phi_{(C-B)} = 0.04 \text{ m}$

Procedimiento para el Diseño agronómico:

Tabla 27:Prueba de campo.

Prueba de campo		
Ve (l)	r (m)	pb (m)
4	0,25	0,3
8	0,33	0,39
12	0,4	0,50
16	0,59	0,63
20	0,76	0,69
24	0,8	0,9
28	0,83	1,05
32	0,86	1,22
36	0,9	1,4
40	0,91	1,6

Prueba de campo escogida		
Ve (l)	r (m)	p (m)
32	0,86	1,22

Calculo de las necesidades neta hídricas puntas:

$$N_H = E_{V_{10\%p}} \times K_p \times K_b \times K_l \times K_a = 6.445 \text{ mm/d}$$

Calculo del coeficiente debido a la localización:

$$K_l = P_c + 0.1 = \frac{A_c}{A_{mp}} + 0.1 = 1.03$$

Calculo del área de la proyección vertical de la copa del árbol:

$$A_c = S_p \times D_c = 22.4 \text{ m}^2$$

Calculo de las Necesidades Totales.

$$N_t = \frac{N_H}{C_u \times (1-K)} = 8.63 \text{ mm/d}$$

$$K = 1 - E_{fap} = 0.05$$

Calculo de las Necesidades de lavado:

$$L_R = \frac{CE_{ar}}{2 \times CE_{es}} = 0.17$$

$$0.9 \times Prad \leq pb \leq 1.2 \times Prad$$

$$pb = 1.22$$

Determinación del área mojada por un emisor:

$$A_e = \pi \times (R_e)^2 = 2.32 \text{ m}^2$$

Número de emisores que humedecen una misma planta.

$$e \geq \frac{A_{MP} \times PH_{Min}}{100 \times A_e} = 4 \text{ emisores}$$

Volumen del bulbo:

$$V_e = \frac{IR \times N_T}{e} = 51.77 \text{ L}$$

Tiempo de riego:

$$T_R = \frac{N_t}{e \times Q_e} = 13 \text{ h}$$

Dosis de riego:

$$DR = e \times Q_e \times TR_{ajustado} = 208 \text{ L} \geq N_t$$

Diseño Hidráulico:

Emisor Autocompensante:

Presión al inicio del lateral:

$$h_0 = H_e + (0.77 \times hf_{lat}) + \frac{\Delta Z_{lat}}{2} = 16.872 \text{ mca}$$

Pérdidas de carga en el lateral:

$$hf_{lat} = J \times F \times L_{lat} = 0.353 \text{ m}$$

Coefficiente de pérdidas por salidas múltiples:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2n} + \frac{\sqrt{m-1}}{6 \times n^2} = 0.355$$

Pérdidas por rozamiento hidráulico:

$$J = 0.473 \times \phi^{-4.75} \times Q_{lat}^{1.75} = 0.01$$

Gradiente Hidráulico:

$$J^l = J \times \left(\frac{S_e + L_e}{S_e} \right) = 0.02$$

Caudal del lateral.

Separación entre emisores de un mismo lateral:

$$S_e = R_e \times \left(2 - \frac{a}{100} \right) = 1.98 \text{ m}$$

Longitud equivalente de la conexión de un emisor:

$$L_e = 18.91 \times \phi^{-1.87} = 356.38 \text{ m}$$

$$Q_{lat} = Q_e \times N_{e_{lat}} = 416 \text{ L/h}$$

Presión mínima en el lateral.

$$h_{min} = h_0 - hf_{lat} - \Delta Z_{lat} = 13.32 \text{ mca}$$

$$5\text{mca} \leq h_{min} \leq 30\text{mca}$$

Variación de presión en el lateral.

$$\Delta h_{lat} = h_0 - h_{min} = 3.553 \text{ mca}$$

$$5\text{mca} \leq \Delta h_{lat} \leq 30\text{mca}$$

Para continuar con el diseño hidráulico debe conformarse una tabla que contenga las siguientes variables:

Tramo	Q _T (L/s)	Ø _T (mm)	V _T (m/s)	L _T (m)	J(m/m)	ΔZ _T (m)	hf _T (mca)	Hi(mca)	H ₀ tramo(mca)
1_2	1.04	70	0.0027	8	0.0015	0.16	0.0117		17.4
2_3	0.924	70	0.0024	8	0.0012	0.16	0.0095	0.1483	17.549
3_4	0.809	60	0.00286	8	0.002	0.16	0.0156	0.3178	17.17.718
4_5	0.693	60	0.00245	8	0.0015	0.16	0.0119	0.4432	17.843
5_6	0.578	50	0.00294	8	0.0026	0.16	0.0206	0.5913	17.991
6_7	0.462	50	0.00236	8	0.0017	0.16	0.014	0.7306	18.131
7_8	0.347	40	0.00276	8	0.003	0.16	0.0244	0.8767	18.277
8_9	0.231	40	0.00184	8	0.0015	0.16	0.012	1.0123	18.412
10	0.116	35	0.0012	8	0.0008	0.16	0.0067	1.1603	18.561
Σ	5.2			72		1.4	0.1264	5.2806	

Presión al inicio de la distribuidora:

$$\frac{\Sigma H_i}{\#_{lat}} = h_0$$

$$H_0 = 17.4 \text{ mca}$$

$$5mca \leq H_0 \leq 30mca$$

Presión mínima en la distribuidora:

Es la presión mínima ($H_{mín_{dist}}$) de la tabla:

$$H_{mín_{dist}} = 17.4 \text{ mca}$$

$$5mca \leq H_{mín_{dist}} \leq 30mca$$

Presión mínima en la parcela:

$$H_{mín_{PR}} = H_{mín_{dist}} - \Delta h_{lat} = 13.847 \text{ mca}$$

$$5mca \leq H_{mín_{PR}} \leq 30mca$$

Caudal en la válvula:

$$Q_V = 416 \text{ L/h}$$

Presión en la válvula:

$$H_V = H_{ini} + hf_{(Hini-v)} + \Delta Z_{(Hini-v)} = 17.594 \text{ mca}$$

Presión en la bomba:

$$H_B = H_{V1} + hf_{(V1-B)} + \Delta Z_{(V1-B)} = 18.345 \text{ mca}$$

Caudal en la bomba:

$$Q_B = \Sigma Q_{lats} = 1664 \text{ L/h}$$

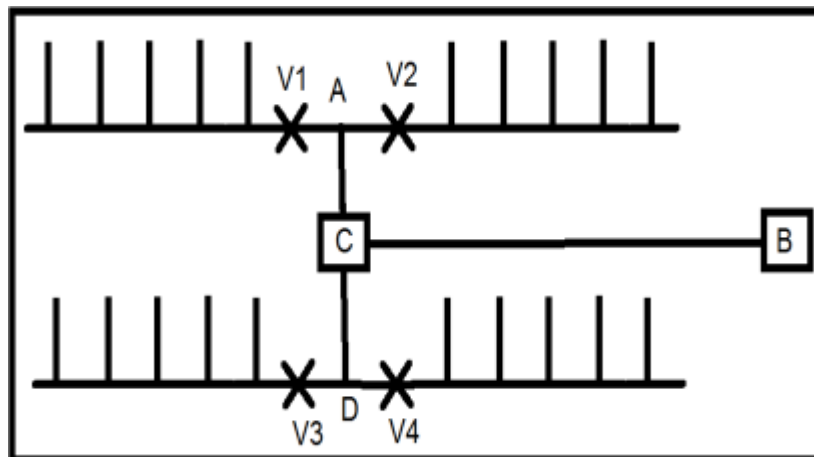


Figura 31:Esquema del diseño , (Creación personal)

III.3.- Ejercicios propuestos.

Propuesto 1: Se desea diseñar un sistema de riego por aspersión convencional con los siguientes datos:

$E_{v25\%p} = 7.9 \text{ mm/d}$	$K_p = 0.84$	$KC = 0.9$	$\alpha = 0.9 \text{ g/cm}^3$
$CC = 38.6 \% P_{SS}$	$L_p = 85 \% CC$	$E_{fr} = 76.5 \%$	$Q_{asp} = 0.00087 \text{ m}^3/\text{s}$
$V_v = 3 \text{ m/s}$	$R_{ALC} = 13 \text{ m}$	$V_{inf} = 30 \text{ mm/h}$	$H_{ASP} = 35 \text{ mca}$
$\Delta Z_{lat} = 0 \text{ m}$	$\Delta Z_{dis} = 0 \text{ m}$	$H_{ELE} = 0.9 \text{ m}$	$\emptyset_{lat} = \emptyset_{dist} = 0.0798 \text{ m}$
$C_{HW} = 150$	$hf_{loc} = 1 \text{ mca}$	$L_{lat} = 72 \text{ m}$	$H_{prof} = 0.9 \text{ m}$
$E_{fap} = 85 \%$	$V_v = 3 \text{ m/s}$	$L_{dist} = 216 \text{ m}$	

Pendiente del terreno 0 %

$L_{(Hini-V)} = 10 \text{ m}$	$L_{(V1-A)} = 10 \text{ m}$	$L_{(A-B)} = 80 \text{ m}$	$L_{(B-C)} = 80 \text{ m}$	$L_{(C-D)} = 15 \text{ m}$
$\emptyset_{(HINI-V)} = 0.0798 \text{ m}$	$\emptyset_{(V-A)} = 0.0798 \text{ m}$	$\emptyset_{(A-B)} = 0.099 \text{ m}$	$\emptyset_{(B-C)} = 0.12 \text{ m}$	$\emptyset_{(C-D)} = 0.12 \text{ m}$

Respuesta:

$I_R = 7 \text{ d}$	$I_{AP} = 12.325 \text{ mm/h}$	$E_{ASP} = 12 \text{ m}$	$E_{LAT} = 18 \text{ m}$	$k = 0.779$
$T_{AP} = 5 \text{ h}$	$T_R = 5.5 \text{ h}$	$T_{od} = 20 \text{ h}$	$h_{INI} = 36.12 \text{ mca}$	$Q_{dist} = 0.0061 \text{ m}^3/\text{s}$
$H_{FIN} = 38.023 \text{ mca}$	$H_{INI} = 42,094 \text{ mca}$	$Q_B = 0.0244 \text{ m}^3/\text{s}$	$H_v = 42.269 \text{ mca}$	$H_B = 47.182 \text{ mca}$

Propuesto 2: Se desea diseñar un sistema de riego por aspersión mecanizada mediante un pivote con los siguientes datos:

$A = 49 \text{ ha}$	$E_{v25\%p} = 7 \text{ mm/d}$	$K_p = 0.79$	$KC = 0.8$	$P_{rad} = 70 \text{ cm}$
$T_{od} = 20 \text{ h}$	$E_{fr} = 90 \%$	$H_{ASP} = 15 \text{ mca}$	$\emptyset_{(P)} = 0.189 \text{ m}$	
$Q_{asp} = \text{m}^3/\text{s}$	$h_{pivote} = 4 \text{ m}$	$R_{asp} = 6 \text{ m}$	$CA = 1 \text{ mm/cm}$	$\%AU = 40\%$
$Sep/torres = 35 \text{ m}$	$i_{pivote} = 2 \%$	$H_{ELE} = \text{m}$	$E_{fap} = 90 \%$	$Alm. Sup = 7.6 \text{ mm}$
$C_{HW} = 150$	$\emptyset_{pivote} = 0.18 \text{ m}$	$L_{lat} = \text{m}$	$H_{prof} = \text{m}$	$V_{m\acute{a}x} = 1.9 \text{ m/s}$
$L_{(HP-V1)} = 5 \text{ m}$	$L_{(V1-A)} = 450 \text{ m}$	$L_{(A-B)} = 450 \text{ m}$	$L_{(B-C)} = 15 \text{ m}$	
$\emptyset_{(V1-A)} = 0.189 \text{ m}$	$\emptyset_{(A-B)} = 0.25 \text{ m}$	$\emptyset_{(B-C)} = 0.25 \text{ m}$	$\emptyset_{(HP-V1)} = 0.189 \text{ m}$	
$i_{(HP-V1)} = 2 \%$	$i_{(V1-A)} = 0 \%$	$i_{(A-B)} = 0 \%$	$i_{(B-C)} = 0 \%$	

Respuesta:

$R_{Pivote} = 470 \text{ m}$	$\#torres = 13$	$Q_P = 63.929 \text{ l/s}$	$I_R = 2 \text{ d}$	$T_{RR} = 40 \text{ h}$
$H_P = 32.598 \text{ mca}$	$hf_P = 5.198 \text{ m}$	$H_v = 32.73 \text{ mca}$	$H_{bomba} = 50.69 \text{ mca}$	
$Q_{bomba} = 0.128 \text{ m}^3/\text{s}$				

Propuesto 3: Se desea diseñar un sistema de riego por aspersión mecanizada mediante un enrollador con los siguientes datos:

$A = 18.5 \text{ ha}$ $E_{v25\%p} = 8.86 \text{ mm/d}$ $K_p = 0.79$ $KC = 0.9$ $P_{rad} = 67 \text{ cm}$
 $T_{od} = 19 \text{ h}$ $E_{fap} = 75 \%$ $CA = 1 \text{ mm/cm}$ $i_E = 0 \%$ $H_{ELE} = m$
 $E_{fap} = \%$ $C_{HW} = 150$ $V_{inf} = 24.5 \text{ mm/h}$ $\alpha = 220^\circ$ $V_v = 2.5 \text{ m/s}$
 $\% \emptyset_{Moj} = 75 \%$ $T_c = 1 \text{ h}$ $i_{(parcela)} = 0\%$
 $L_{(H-V1)} = 50 \text{ m}$ $L_{(V1-A)} = 10 \text{ m}$ $L_{(A-B)} = 380 \text{ m}$ $L_{(B-C)} = 195 \text{ m}$ $L_{(C-D)} = 10 \text{ m}$
 $\emptyset_{(H-V1)} = 0.11 \text{ m}$ $\emptyset_{(V1-A)} = 0.11 \text{ m}$ $\emptyset_{(A-B)} = 0.2 \text{ m}$ $\emptyset_{(B-C)} = 0.4 \text{ m}$ $\emptyset_{(C-D)} = 0.4 \text{ m}$

Respuesta:

$D_N = 36.85 \text{ mm}$ $D_B = 49.133 \text{ mm}$ $N_H = 6.3 \text{ mm/d}$ $I_{RR} = 6 \text{ d}$ $D_{NR} = 37.977 \text{ mm/h}$
 $D_{BR} = 50.396 \text{ mm/h}$ $Q = 22.72 \text{ L/s}$ $lap = 14.645 \text{ mm/h}$ ancho de la parcela = 374 m
largo de la parcela = 495 m $\#_{band} = 6$ $a_b = 82.5 \text{ m}$ $\% \emptyset_{moj} = 67.623 \%$ $E = 82.5 \text{ m}$
 $V_{av} = 20.327 \text{ m/s}$ $T_i = 1.22 \text{ h}$ $T_f = 0.776 \text{ h}$ $T_{av} = 7.183 \text{ h}$ $T_{RR} = 9.179 \text{ h}$
 $L_{mang} = 146.333 \text{ m}$ $h_{f_{mang}} = 0.132 \text{ m}$ $D_i = 40.667 \text{ m}$ $H_H = 73.282 \text{ mca}$
 $H_V = 75.371 \text{ mca}$ $Q_B = 0.0941 \text{ m}^3/\text{s}$ $H_B = 79.129 \text{ mca}$

Propuesto 4: Se desea diseñar un sistema de riego localizado por goteo con emisores no autocompensantes con los datos siguientes:

$Q_e = 4.5 \text{ L/h}$ $E_{V25\%P} = 8 \text{ mm/d}$ $K_P = 0.9$ $K_b = 0.77$ $K_a = 1$ $Sp = 4 \text{ m}$ $D_c = 5.6 \text{ m}$
 $Si = 6 \text{ m}$ $CU = 90 \%$ $LP = 92 \&CC$ $Nep = 1$ $E_{fap} = 90 \%$ $CE_{ar} = 0.8$ $CE_{es} = 2.3$
 $h = 1 \text{ m}$ $Re = 0.86 \text{ m}$ $CC = 50 \%$ P_{ss} $I_{rasumido} = 1 \text{ d}$ $PH_{min} = 33 \%$
 $He = 14 \text{ mca}$ $L_{lat} = 100 \text{ m}$ $\emptyset_{lat} = 15 \text{ mm}$ $K = 10.83$ $x = 0.4884$ $C_v = 1.13 \%$
 $\emptyset_{dist} = 0.015 \text{ mm}$ $L_{(V1-A)} = 5 \text{ m}$ $L_{(A-C)} = 10 \text{ m}$ $L_{(C-D)} = 10 \text{ m}$ $L_{(C-B)} = 50 \text{ m}$ $\emptyset_{(V1-A)} = 0.015 \text{ m}$
 $\emptyset_{(A-C)} = 0.02 \text{ m}$ $\emptyset_{(C-B)} = 0.04 \text{ m}$

Respuestas:

$N_H = 5.729 \text{ mm/d}$ $N_T = 7.67 \text{ mm/d}$ $Amp = 24 \text{ m}^2$ $e = 4$ $Tr = 0.25 \text{ h}$ $Ve = 0.46 \text{ L}$
 $Dr = 4.5 \text{ L}$ $h_0 = 15.934 \text{ mca}$ $Q_{lat} = 468 \text{ L/h}$ $h_{min} = 12.3 \text{ mca}$ $\Delta h_{lat} = 3.634 \text{ mca}$
 $H_0 = 16.451 \text{ mca}$ $H_{mindist} = 16.451$ $H_{min PR} = 12.817 \text{ mca}$ $Q_v = 468 \text{ L/h}$
 $H_V = 16.645 \text{ mca}$ $H_B = 17.396 \text{ mca}$ $Q_B = 1872 \text{ L/h}$