



Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Hidráulico



*TÍTULO: Consideraciones sobre los contenidos de la asignatura
Ingeniería de Drenaje Agrícola.*

Diplomante: Carlos Manuel Medina Columbié.

*Tutores: Dr. C. Pável Vargas Rodríguez. PT.
Ing. Abel Dorta Armaignac. PA.*

Santiago de Cuba

Curso 2019 -2020

“Año 62 de la Revolución”

PENSAMIENTO:



***"LOS CIENTÍFICOS ESTUDIAN AL MUNDO TAL
COMO ES; LOS INGENIEROS CREAN EL MUNDO QUE
NUNCA HA SIDO."***

ERNESTO CHE GUEVARA.

DEDICATORIA:

***"A MIS PADRES POR HABERME
ENTREGADO TODO SU EMPEÑO Y
DEDICACIÓN, SUS NOCHES DE DESVELO Y
CONFIANZA, POR CREER SIEMPRE EN MI,
POR DEDICAR SU ESFUERZO EN HACER
DE MI UN HOMBRE DE BIEN, A TODO
AQUEL QUE DE CIERTA MANERA A
CREÍDO EN MÍ Y ME HE BRINDADO SU
APOYO EN ALGÚN MOMENTO."***

AGRADECIMIENTOS:

A Dios por haberme dado la fuerza suficiente para culminar este largo viaje, y por haber colocado a mi lado esos dos ángeles que me cuidaron todos estos años, mis padres, a ellos, muchas gracias por su paciencia, a mi madre por sus oraciones y suplicas que siempre iluminaron mi camino y a mi padre por ser mi honorable compañero de viaje.

A mi novia Aylín por haber sido y seguir siendo mi compañera de vida durante mucho tiempo, a mis suegros por haberme abierto las puertas de su casa y darme todo el cariño posible.

A mi familia, a mi prima Sonia que desde la distancia también me brindó su apoyo, a mis primos y vecinos Ernesto y Beba, a todos mis tíos y tías,

A mis amigos de mis batallas Jose.L, Reinier, Gilbert El zombí, Luis Mario, Karel, Marquito, Tatí, El javao, Zulema, El bodo, Javier, Onnel y a sus padres, a todos mis compañeros de aula, a los amigos de mi padre.

A mi tutor por su apoyo y dedicación en la realización de este trabajo.

A los profesores que me impartieron clases y a mi instructora Laudelina,

A todas las personas que tuvieron que ver de una manera u otra en la culminación de mis estudios.

A todos

MUCHAS GRACIAS

RESUMEN:

El presente trabajo se realizó con el objetivo de elaborar el Programa Analítico de la asignatura Ingeniería de Drenaje Agrícola, para formar un profesional más capacitados para resolver los problemas profesionales relacionados con el Saneamiento Agrícola. Para ello se ha concebido un sistema de conocimientos y habilidades, que incluye las exigencias del diseño de los sistemas de Drenaje Agrícola y las Técnicas de lavado y recuperación de suelos salinos. Para la elaboración del mismo se realizó una revisión bibliográfica que permitió fortalecer el sistema de contenidos y habilidades de la asignatura, sobre la base de actualizar el estado actual del arte de las tecnologías de Saneamiento Agrícola así como el fundamento teórico para su dimensionamiento y los procedimientos para el diseño de sistemas de drenaje agrícola y la programación de lavados y recuperación de suelos salinos. Como principales resultados se propone el programa Analítico de la asignatura Ingeniería de Drenaje Agrícola y se exponen ejercicios resueltos y propuestos relacionados con la materia, los cuales que contribuyen a desarrollar habilidades en los estudiantes.

ABSTRACT:

The present work was carried out with the aim of preparing the Analytical Program of the Agricultural Drainage Engineering subject, to train a more qualified professional to solve professional problems related to Agricultural Sanitation. For this, a system of knowledge and skills has been conceived, the requirements of the design of the Agricultural Drainage Systems and the Techniques for washing and recovering saline soils. For its elaboration, a bibliographic review was carried out that allowed to strengthen the content and skills system of the Agricultural Drainage Engineering course, based on updating the current state of the art of Agricultural Sanitation technologies and the foundation theoretical for its dimensioning, as well as characterizing the procedures for the design of agricultural drainage systems and the programming of washing and recovery of saline soils. As main results, the Analytical program of the Engineering and Drainage course is proposed as well the exposed and proposed exercises related to the subject and that contribute to developing skills in the students are exposed.

ÍNDICE:

PENSAMIENTO	2
DEDICATORIA:	3
AGRADECIMIENTOS:	4
RESUMEN:	5
ABSTRACT:	6
INTRODUCCIÓN:	8
I.- Revisión bibliográfica	12
I.1.- Antecedentes y evolución de los sistemas de saneamiento agrícola.	13
I.1.1.- Importancia de los sistemas de saneamiento agrícola.	14
I.2.- Definición de los sistemas de saneamiento agrícola.	15
I.2.1.- Clasificación. Componentes.	16
I.2.2.- Ventajas e Inconvenientes.	20
I.2.3.- Influencia del mal drenaje en las propiedades del suelo y los cultivos.	23
I.2.4- Prácticas agrícolas contra la salinidad	27
I.3.- Fundamentos teóricos del diseño.	30
I.4.- Normas y Regulaciones consideradas en la práctica del diseño	41
I.4.1.- Documentación para los proyectos de saneamiento agrícolas	42
I.5.- Efectos Ambientales	43
II.- Procedimientos para el diseño de sistemas de drenaje.	46
II.1.- Procedimiento para el diseño hidrológico de sistemas de drenaje superficial	47
II.2.- Procedimiento para la programación de lavados de suelos salinos	49
II.3- Procedimiento para el diseño hidrológico de sistemas de drenaje subterráneo	52
II.4.- Introducción al diseño de obras de protección contra inundaciones	60
III.- Consideraciones sobre los contenidos de la asignatura Ingeniería de Drenaje.	68
III.1 Programa analítico.	69
III.2 Ejercicios resueltos	76
III.3 Ejercicios propuestos.	90
CONCLUSIONES:	92
RECOMENDACIONES:	93
BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
ANEXOS:	97

INTRODUCCIÓN:

La existencia de agua excesiva, tanto en la superficie como en el perfil del suelo, influye negativamente en los resultados agrícolas que se esperan de una zona determinada. En ocasiones, a lo anterior se suma la presencia de tenores salinos en magnitudes inadmisibles para los cultivos planificados, contribuyendo con ello a empeorar la situación imperante en dicha zona. Ya desde la antigüedad, el hombre más por intuición que por una valoración científica comprende la necesidad de evacuar el exceso de agua de lluvia de las zonas llanas, en esto se destaca países del Centro y Norte europeo (Francia, Alemania y Holanda). Por otra parte, los fracasos obtenidos en el riego en muchas partes del mundo, como por ejemplo el hoy desierto salinizado de la antigua Mesopotamia (considerado en su momento el granero del mundo por la fertilidad de sus tierras), hicieron que se iniciase en el ámbito mundial el estudio de los fenómenos que rigen el deterioro de la estructura productiva del suelo, entendiéndose Técnicas de drenaje agrícola y desalinización.

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 en 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 este contexto garantizar la calidad del graduado constituye una de las claves en el camino del éxito y para lograrlo es necesario adaptar los nuevos contenidos de la Disciplina Riego y Drenaje al limitado fondo horario convenido (104 horas presenciales). En el caso particular de la asignatura Ingeniería de Drenaje Agrícola, a pesar de disponer con un excelente texto básico, las transformaciones establecidas por el Plan de Estudios E, así como la necesidad de actualizar los procedimientos para el dimensionamiento de sistemas de drenaje agrícola y para la programación de labores de lavado y recuperación de suelos salinos que se aplican en las empresas de Consultoría y Diseño de las ENPA , justifican la aplicación de modificaciones en la selección e impartición de los contenidos. En los párrafos

anteriores se resume la situación problemática que enmarca el presente Trabajo de Diploma. Por todo lo expresado anteriormente se propone el siguiente Diseño de Investigación.

Problema de Investigación:

¿Cómo incrementar la pertinencia del sistema de contenidos y habilidades relacionados con el Saneamiento Agrícola de manera que contribuya a la formación de un ingeniero hidráulico más capacitado para resolver los problemas profesionales relacionados con la Ingeniería de Drenaje Agrícola y la Recuperación de suelos salinos?.

Objeto de la Investigación:

Identificar las características tecnológicas de los sistemas de drenaje agrícola, así como los fundamentos teóricos para su diseño. Específicamente los contenidos que abordan el procedimiento de los diseños hidrológicos e hidráulicos de los sistemas de drenaje agrícola y para la programación de lavados de recuperación y mantenimiento los cuales constituyen el Campo de Acción de la Investigación.

Hipótesis:

Si se incrementa el rigor del sistema de contenidos y habilidades de la asignatura Ingeniería de Drenaje, de acuerdo a los avances tecnológicos actuales, se contribuye formar un profesional más capacitado para resolver los problemas profesionales relacionados con el Saneamiento Agrícola.

Objetivo General:

Se concreta en elaborar el Programa Analítico de la asignatura Ingeniería de Drenaje, sustentado un sistema de conocimientos y habilidades que tenga en cuenta los avances tecnológicos actuales y las exigencias del diseño de los sistemas de Drenaje Agrícola y las Técnicas de lavado y recuperación de suelos salinos.

Objetivos Específicos:

1. Actualizar el estado del arte de las tecnologías de Drenaje Agrícola y Recuperación de suelos salinos y el fundamento teórico para su diseño.
2. Caracterizar los procedimientos para el diseño de sistemas de drenaje agrícola y la programación de lavados y recuperación de suelos salinos.
3. Proponer el programa Analítico de la asignatura Ingeniería de Drenaje Agrícola.

Aportes:

Desde el punto de vista Metodológico en el trabajo se aborda el dimensionamiento de sistemas de drenaje agrícola y la programación de lavados de recuperación y mantenimiento combinados con el riego agrícola, 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 del diseño, el trabajo actualiza los procedimientos que se utilizan en la práctica del diseño.

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 los créditos 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. El Informe de tesis se ha dividido en tres partes. Una primera parte en la cual se describe el estado actual del arte sobre las tecnologías de Drenaje Agrícola y Recuperación de suelos salinos con un enfoque mayormente docente y 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. Se abordan: el fundamento teórico que sustenta el dimensionamiento de los sistemas de drenaje agrícola, así como los criterios normativos vigentes en la actividad de proyectos de drenaje agrícola.

En la segunda parte del informe se caracterizan los procedimientos para el diseño hidrológico e hidráulico sistemas de drenaje superficial y subterráneo, así como la programación de lavados y recuperación de suelos salinos. Como complemento, se anexa

información tabulada y gráfica que contribuye a una mejor asimilación de los contenidos del mismo

La tercera parte del informe de tesis está dedicado a las consideraciones sobre la impartición de la asignatura Ingeniería de Drenaje Agrícola y se propone el Programa Analítico de la asignatura, en el cual se destaca la distribución del sistema de contenidos y habilidades en el fondo horario disponible en el nuevo Plan de Estudios E de la carrera de Ingeniería Hidráulica y el calendario de las actividades teóricas, prácticas y evaluativas planificadas. Como complemento a esta parte se ofrecen 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.

I.- Revisión bibliográfica.

I.1.- Antecedentes y evolución de los sistemas de saneamiento agrícola.

En países de clima húmedo como Cuba, ha existido la costumbre de abordar los problemas que originan los excesos de lluvias con obras de protección y evacuación de inundaciones, quedando rezagadas las soluciones para el drenaje parcelario, pero es precisamente este tipo de trabajo el que garantiza en última instancia la extracción de los excesos de agua de la capa de suelo donde se desarrollan los cultivos, y por consiguiente, este drenaje interior de los campos es el que puede incrementar los rendimientos agrícolas, lo que a su vez justificaría económicamente todas las demás inversiones.

Se trata pues de resolver los problemas de mal drenaje con un enfoque integral, vinculando las obras de control y protección contra inundaciones (para las aguas externas) con las obras y labores del verdadero drenaje en las parcelas cultivadas. **(Vigoa 2000)**. Estos elementos corroboran la importancia del drenaje en el desarrollo agrícola de un país, no solo como contribución a la producción de alimentos, también para la protección y conservación de sus recursos naturales

Se piensa que la práctica del drenaje es tan antigua como la agricultura. Tan remoto como en el año 400 a.n.e, el historiador griego Herodoto hace referencia a los trabajos de drenaje realizados en el Valle del Nilo. Catón (200 a.n.e) y Virgilio (40 a.n.e), mencionan en sus escritos los canales de drenaje y otras obras para beneficiar las tierras en las primeras naciones del oriente. En Cuba, después del triunfo revolucionario, se comienza un impetuoso desarrollo hidráulico, realizándose la construcción de numerosas obras que han servido no sólo para el aprovechamiento de preciado líquido, sino también para regular y controlar los grandes escurrimientos originados por las lluvias extraordinarias y ciclónicas. Paralelamente se incrementaron las áreas bajo riego en una proporción adecuada; en cuanto a las zonas más afectadas por problemas de inundación y mal drenaje, además de las presas reguladoras, se reconstruyeron canales colectores abandonados y se erigieron nuevos colectores principales, se rectificaron ríos, arroyos y se construyeron diques de protección contra las crecidas. No es hasta la década del 80 que se comienza un trabajo inversionista importante de drenaje de campos cultivados o drenaje parcelario, que en estos momentos se encuentra en fase de desarrollo.

La experiencia internacional indica que las acciones de drenaje se ubican entre las inversiones que más pronto se recuperan, muestra de ello está el hecho de que en los

países desarrollados es donde más se han aplicados los avances tecnológicos en materia de drenaje y recuperación de suelos salinos. Sin embargo en países como Cuba, por determinadas razones, las inversiones en Drenaje Agrícola es un tema que no es atendido con la prioridad necesaria

En la actualidad, esta temática va recuperando el espacio perdido y ocupa un lugar importante dentro de las acciones que desarrolla el país en su enfrentamiento a las consecuencias del Cambio Climático. Los avances tecnológicos no solo se encaminan a proteger importantes áreas agrícolas, sino también a recuperar y conservar aquellas que son potencialmente útiles para producir alimentos, siendo los ingenieros hidráulicos, los profesionales encargados de promover las soluciones necesarias.

I.1.1.- Importancia de los sistemas de saneamiento agrícola.

Los excesos de agua en el suelo pueden tener consecuencias severas tanto para el suelo como para los cultivos, por lo que se hace necesario establecer un adecuado sistema de saneamiento agrícola. Los párrafos que le siguen, relacionan aspectos que argumentan la importancia que desde el punto de vista ambiental y de la producción de alimentos agrícolas, conlleva el establecimiento de estos sistemas.

Se logra disminuir a niveles apropiados para las explotaciones agrícolas la salinidad de los suelos, la cual es consecuencia de un drenaje deficiente, En los terrenos mal drenados se acumulan sales disueltas en el agua de riego o de escorrentía, pudiendo salinizar la solución del suelo y dosificar el complejo de cambio, esta situación provoca efectos negativos en la fisiología de las plantas por lo que es necesario implementar un sistema de drenaje para evitar esta situación.

Con los sistemas de drenaje, también se contribuye a erradicar la deficiencia de oxígeno en la solución del suelo. Cuando el oxígeno disponible en el suelo disminuye por el exceso de agua, por debajo de unos niveles que pueden ser distintos para cada planta, las raíces disminuyen sus actividades fisiológicas. Con la disminución del contenido de oxígeno la microflora desaparece gradualmente, siendo sustituida por organismos anaeróbicos, que pueden influir en la disponibilidad de ciertos elementos, cuyo equilibrio es importante para el crecimiento y desarrollo de la planta.

La existencia de un buen sistema de drenaje, permite trabajar en suelos con contenidos altos de humedad, esta característica evidencia la necesidad de estos sistemas,

fundamentalmente en muchos suelos arcillosos donde los problemas de mal drenaje originan la destrucción de la estructura del suelo.

La humedad del suelo afecta de forma distinta a los agentes de enfermedades de las plantas, generando podredumbre, hongos e incluso enfermedades víricas. Estas enfermedades pueden ser evitadas con los sistemas de saneamiento agrícola. Así mismo, los niveles excesivamente altos de agua en el suelo, incluso de corta duración, pueden ejercer una influencia en la producción, dependiendo de las fases de desarrollo de las plantas en el momento en que se producen.

1.2.- Definición de los sistemas de saneamiento agrícola.

De acuerdo con (Vigoa 2000), se define como saneamiento agrícola (también llamado por algunos autores como drenaje agrícola), al conjunto de medidas que se realizan para evacuar los excesos de aguas libres, superficiales o subterráneas, en un área de terreno determinada, con el objetivo de mantener un régimen de humedad en el suelo favorable para el crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas.

El Drenaje Agrícola consiste en la remoción del exceso de agua de la superficie y/o del perfil del suelo en terrenos cultivables, tanto por gravedad como por medios artificiales. Las dos principales razones para mejorar el drenaje en los suelos agrícolas son la conservación del suelo y el mejoramiento de la producción de los cultivos. Los sistemas de drenaje se diferencian en el sitio de donde es removida el agua: cuando el exceso de agua es removido de la porción superficial del suelo (conjuntamente y con menor frecuencia en el interior del suelo), el sistema se denomina Drenaje Superficial, mientras que cuando el exceso de agua es removido principalmente del perfil del suelo, se denomina Drenaje Subterráneo. De lo anterior se deduce que para lograr su objetivo las acciones de Saneamiento Agrícola deben incluir el estudio de todo lo referente al origen, captación, conducción y disposición de los excesos de aguas perjudiciales a los terrenos cultivados o, a aquellos que se quieren beneficiar para ponerlos en producción, abarcando un amplio espectro de situaciones que se pueden presentar como causantes del problema y consecuentemente una variada gama de posibilidades técnicas para solucionarlo.

I.2.1.- Clasificación. Componentes.

Clasificación de los de los sistemas de drenaje agrícolas:

1.- Drenaje de contención: Se emplea para evitar que el agua procedente de tierras más altas alcancen zonas más bajas, por lo cual también se denomina Sistema de Drenaje Interceptor. Pueden estar constituidos por diques o drenes subterráneos que atraviesan las pendientes, para interceptar el agua y desviarla hacia depósitos naturales o artificiales antes de que afecten las tierras bajas.

2. Drenaje abierto: También se le denomina Sistema de Drenaje Superficial, es un sistema que consta generalmente de conducciones abiertas en el terreno (zanjas, canales, vaguadas naturales, etc.) que se ubican en función de la pendiente y el relieve del área que se pretende sanear y pueden cumplir funciones interceptoras y reguladoras de los escurrimientos superficiales. Se utiliza cuando parte del agua de lluvia y/o de riego no se infiltra en el terreno, sino que escurre sobre su superficie hasta alcanzar un cauce que la elimina de la zona, cuando la eliminación superficial de esta agua en exceso no es suficiente se producen encharcamientos que perjudican a la producción agrícola.

3. Drenaje soterrado: También se le denomina Sistema de Drenaje Subterráneo o Subsuperficial, el método más utilizado es la colocación de tubos en los cuales el exceso de agua en la tierra se filtra en ellos a través de agujeros que se perforan expresamente para este fin. También se utilizan elementos filtrantes en el suelo como grava, piedras y otros. En cualquiera de estos sistemas con el tiempo se producen obstrucciones que es necesario eliminar con trabajos adicionales complicados y caros.

Componentes del Sistema de Drenaje Superficial:

Cada uno de los elementos que componen un sistema de drenaje deben encontrarse en una posición característica en el terreno dada fundamentalmente por el relieve y realiza determinadas funciones, no obstante en ocasiones pueden faltar algunos de estos elementos y en otros variar su ubicación respecto a las curvas de nivel, todo esto en función de cumplir su objetivo fundamental de evacuar las aguas excesivas de la zona.

Los elementos del sistema de drenaje superficial, son canales que se enumeran más abajo, se incluyen en el proyecto de drenaje, así como los canales de cinturón, canales aliviaderos, etc. Estos elementos se pueden agrupar de la siguiente forma:

1. Los que pertenecen a la Red Interna o temporal y que tienen la función de captar el escurrimiento, (función reguladora).
2. Los que pertenecen a la Red Sistemática y que tienen la función de conducir el escurrimiento captado fuera del área, (función conductora).

La primera comprende los surcos, las cunetas y los vertedores y la segunda los diferentes elementos de conducción como colectores y canales principales.

Surcos o Secadores: Se encuentran ubicados por la máxima pendiente del terreno y conducen las aguas captadas a los vertedores, deben ser reconstruidos al finalizar cada cosecha. En las zonas de pendiente fuerte no son imprescindibles, pero en las zonas llanas en las que se desea realizar una rápida evacuación de las aguas su construcción cobra importancia. La profundidad es de 20 a 30 cm. y en las zonas en que se riega superficialmente los propios surcos de riego pueden realizar esta función.

Cunetas: Si esta recibiera agua de algún vertedor entonces adquiere categoría de colector secundario, también deben ser reconstruidos al finalizar cada cosecha.

Vertedores (canales laterales o cabeceras de los campos): Los vertedores pueden interceptar parte del escurrimiento subterráneo, aunque no hayan sido diseñados para esto y sin que resuelvan el problema de las aguas subterráneas. Tienen la categoría de un canal terciario y deben permitir el paso de la maquinaria agrícola por lo que frecuentemente se diseñan con una sección triangular de taludes tendidos, (**badén de drenaje**), al igual que los anteriores elementos que conforman la red temporal de drenaje, deben ser reconstruidos al finalizar cada cosecha.

La profundidad de estos canales es pequeña, se encuentra siempre entre 0.5 y 0.7 m., en casos excepcionales se construyen de sección trapezoidal con un ancho de fondo entre 0.3 y 0.4 m., no obstante esta sección no es aplicable a todas las condiciones. Puede darse el caso que los caudales sean elevados y por tanto se aumenta considerablemente esta sección, estos canales es preferible que sean rectos pero en determinadas ocasiones se impone la necesidad de trazarlos con determinada curvatura debiendo ser esta $R \geq 2B$. La literatura reconoce longitudes de los vertedores de entre 500 y 1500 m., pero en la práctica del diseño se ha demostrado que canales vertedores mayores de 400m encarecen los proyectos y conllevan complicaciones en la etapa constructiva de la red parcelaria.

La distancia que debe existir entre dos canales vertedores consecutivos está en dependencia de una serie de factores como son:

- Características del suelo: En estos se resumen la permeabilidad, la rugosidad de la superficie, la capacidad de retención, etc.
- Pendiente del terreno: Es un factor muy importante ya que determina en buena medida la velocidad del escurrimiento.
- Cobertura de la superficie: Dependen fundamentalmente del tipo de cultivo que se desarrolle en la superficie y puede contribuir a retardar en cierta medida el escurrimiento.

El espaciamiento entre vertedores constituye un elemento clave para el adecuado funcionamiento del sistema y al mismo tiempo de su costo, pues si se utilizan espaciamientos pequeños mayor es la longitud total de los canales a construir y los volúmenes de excavación. Existe un considerable número de fórmulas para estimar la distancia entre canales vertedores, una de las más utilizadas en Cuba ha sido la propuesta por A. N. Kostiakov que se plantea es más precisa y más útil en la práctica:

$$D = \frac{78}{n} \times C \times I \times T^2 \times \sqrt[2]{S} \quad (1)$$

Donde:

D.- Distancia entre canales (m).

C.- Coeficiente de escurrimiento.

I.- Intensidad de la precipitación (mm/h, 10 %p).

T.- Tiempo permisible de inundación (horas).

S.- Pendiente del terreno en dirección perpendicular a las curvas de nivel (t ×1).

n.- Coeficiente de rugosidad de la superficie del terreno

Colectores: Su función es colectora y se disponen perpendiculares a las curvas de nivel, pueden ser secundarios o primarios. Su sección transversal generalmente trapecial, se calcula y dimensiona de acuerdo al caudal que debe conducir y los parámetros tales como rugosidad y taludes propios del material donde será construido, su profundidad se encuentra entre 0.8 a 1.5 m. y en ocasiones pueden llegar hasta 2 m. Para su diseño se debe considerar lo siguiente:

- La velocidad máxima debe ser inferior a la velocidad crítica de erosión.
- La velocidad mínima debe ser mayor a la velocidad crítica de sedimentación.

- La sección transversal debe ser diseñada para que tenga conductividad máxima.
- Debe buscarse el mínimo de movimiento de tierra.

Prácticamente la velocidad del agua en el canal varía dentro de los límites de 0.5 hasta 0.7 m/s en suelos de permeabilidad media y de 0.9 a 1.0 m/s en suelos pesados. Los límites máximo y mínimo de la velocidad del agua dependen de la pendiente del canal que varía entre 0.0003 a 0.003. El perfil longitudinal del canal se debe seleccionar de tal forma que la velocidad de la corriente sea uniforme en su recorrido, además esta velocidad no debe sobrepasar los límites de la velocidad crítica. La distancia entre los colectores depende de la longitud de los vertedores variando dentro de 500 a 1500 m. en colectores de acción unilateral a 1000 a 3000 m. en colectores bilaterales. En función del relieve del terreno estos canales pueden tener de 2 a 3 km. de largo y pueden también influir en el descenso del nivel del agua subterránea cuando esta se encuentra próximo a la superficie.

Canal Principal: De manera general, estos canales tienen las mismas características que los canales colectores, solo que por el caudal que deben conducir se diseñan con secciones transversales mayores. En algunas ocasiones se sustituyen por vaguadas o arroyos, las cuales se amplían o rectifican según corresponda.

Receptor: Pueden ser pozos de recarga del manto subterráneo, sumideros o lagunas que permitan su reutilización en caso de que proceda, ríos y el mar.

Componentes del Sistema de Drenaje Subsuperficial:

Un sistema de drenes subsuperficiales tiene como objetivo fundamental el control de la profundidad de la capa freática, de forma tal que el balance de aguas y sales dentro de la zona radicular sea el óptimo para los requerimientos del cultivo en una condición de suelos y clima específico. Para lograr este objetivo, un sistema de drenes subsuperficiales consta fundamentalmente de tres tipos de drenes: laterales, colectores y dren principal. Los drenes laterales generalmente se disponen paralelos unos a otros y tienen como misión principal el control de la profundidad de la capa freática. Los drenes colectores, aunque eventualmente también drenan el terreno adyacente, su misión fundamental es transportar el agua extraída por los laterales hasta el dren principal donde se produce la descarga del sistema. El dren principal, que puede ser artificial o natural (río, estero, otro.), es el que recoge los excedentes provenientes de varios sistemas.

- Los drenes parcelarios: se encuentran soterrados. Son los que eliminan los excesos de humedad por debajo del terreno. Tienen una determinada profundidad según lo requerido del terreno.
- Los badenes: pueden ser zanjas de sección triangular. Realizan la función de colector secundario al recibir las agua de los drenes parcelarios. Evacuan un caudal mayor y también pueden ser soterrados.
- Los drenes colectores: son colectores con mayor dimensión por ser sus caudales mayores. Su función es llevar el agua a colectores mayores. Pueden ser soterrados.
- El dren principal: es el dren que recibe el agua de la parcela. Tiene que tener la mayor dimensión pues evacua toda el agua del campo y es el encargado de llevar el agua al receptor.
- El receptor: puede ser una laguna, pozo, un río o el mar.

1.2.2.- Ventajas e Inconvenientes.

La necesidad del drenaje y los beneficios que reporta para la agricultura siempre han sido difíciles de entender. En muchos casos el drenaje no tiene promotores o patrocinadores y en otros hasta se tiene que convencer a muchos detractores. Las razones se explican por el hecho de que las obras de drenaje son relativamente costosas, requieren de trabajos especializados y principalmente implican plazos durante los cuales no se ve de inmediato el beneficio que reportan. Ha resultado más fácil entender la necesidad e importancia del regadío que la del drenaje, sin embargo, al igual que en determinadas condiciones nos es posible el desarrollo de un cultivo rentable sin los beneficios del regadío, tampoco es posible, bajo otras condiciones, el desarrollo agrícola sin la ayuda del drenaje. Por ello, es prudente puntualizar las principales ventajas del drenaje agrícola:

1. El drenaje permite la aireación del suelo.

Las raíces de las plantas no solo necesitan la presencia del agua como elemento de transporte de los nutrientes del suelo, sino que también les es imprescindible el aire para la respiración e intercambio de gases con la atmósfera. Si el suelo está totalmente saturado de agua, el aire no podrá circular por sus poros y las raíces no podrán realizar sus funciones fisiológicas. Si la saturación es prolongada, las plantas perecen. Si es temporal, la cosecha disminuye. Además, la falta de aire en el suelo afecta el desarrollo de los microorganismos

beneficiosos que viven en él y que son fundamentales para la movilización de los nutrientes que alimentan la planta.

2. El drenaje modifica la constitución física del suelo.

La propia aireación del suelo permite un mayor desarrollo de las raíces de la planta, tanto en volumen como en longitud, las cuales al descomponerse dejan vacíos que comunican el suelo con el subsuelo. Los organismos que viven en el suelo proliferan y van dejando aberturas que se comunican entre sí, Por otra parte. Los suelos drenados se saturan con lluvias y se secan posteriormente, originando fisuras de retracción que facilitan la circulación del agua y aire provenientes de la atmósfera. Todos estos procesos van aumentando la permeabilidad del suelo.

3. El drenaje favorece la nitrificación del suelo.

El drenaje favorece e intensifica ciertos procesos bacterianos en el suelo, que contribuyen a la composición de la materia orgánica y a la producción de sustancias nitrogenadas que sirven de alimentos a las plantas.

4. El drenaje permite la eliminación de las sales perjudiciales del suelo.

Las tierras con exceso de humedad favorecen la disolución de los álcalis y a las sales perjudiciales que por ascenso capilar se acumulan en la capa arable (superficies del suelo), causando gran afectación por la muertes del cultivo. Los conductos de drenaje permiten eliminar estas sales con la evacuación de las aguas en exceso.

5. El drenaje favorece las labores de cultivo.

Los terrenos con exceso de humedad ofrecen mayor resistencia al movimiento de los implementos agrícolas (arados, gradas, subsoladores, etc.).Las tierras drenadas son más fáciles de cultivar, permitiendo un ahorro sensible de potencia y de energía en estas labores.

6. El drenaje facilita la penetración de las raíces.

La penetración de las raíces en el suelo asegura una mayor superficie de captación de nutrientes (más calidad de la cosecha) y un mejor anclaje de la planta en el terreno, aspecto este último muy importantes en los cultivos que pueden ser afectados por fuertes vientos.

7. El drenaje permite aumentar el área de tierra cultivable.

Los terrenos cenagosos o pantanosos además de que no pueden ser aprovechados para la agricultura, constituyen focos de insectos y de otros vectores indeseables para la salud humana y animal, y para la sanidad vegetal.

8. El drenaje facilita y acelera la germinación y el desarrollo vegetativo.

Particularmente en las regiones del clima templado y frío, el aire superficial, más caliente, al penetrar en el suelo drenado va aumentando la temperatura de este, propiciando la germinación de las semillas y un desarrollo más rápido y mejor de las plantas.

Algunos sistemas de drenaje agrícola, han sido mal concebidos y/o diseñados, en otros además no se ha empleado la tecnología constructiva más adecuada, sin embargo. Esta situación conlleva a que resalten algunos inconvenientes de los sistemas de drenaje agrícola, entre ellos se tienen:

1. Inversión inicial costosa.

La ejecución del drenaje requiere de técnicas contractivas especializadas muy diferentes al resto de las labores agrícolas, que por lo general inutilizan durante tiempo considerable el terreno a beneficiar, impidiendo durante ese tiempo la producción agrícola.

2. El drenaje elimina nutrientes del suelo.

Es cierto que los excesos de agua en el suelo al ser evacuados por los drenes arrastran fertilizantes, cal, magnesio y otros nutrientes, pero la experiencia demuestra que este proceso no es significativo a los efectos de la nutrición de las plantas. Lo más importante a tener presente en los terrenos drenados, después de largo tiempo, es la pérdida de cal por lo que en determinados casos hay que realizar un proceso de encalado u otras enmiendas al suelo.

3. El drenaje puede secar en exceso el suelo.

En efecto, en algunos terrenos drenados y determinadas condiciones climáticas, si no se dispone de regadío, la falta de humedad en el suelo puede afectar al cultivo en alguna fase de su ciclo vegetativo.

Ventajas importantes del drenaje superficial sobre el drenaje subterráneo:

1. Además del agua superficial, pueden eliminar el agua freática.
2. Necesita mucho menos pendiente longitudinal.
3. Su inspección es más fácil.

Los inconvenientes más significativos que sustentan la selección de uno y otro sistema de evacuación se pueden resumir así:

- Pérdidas de superficie útil es menor y en ocasiones estas pérdidas superan el 10 %.
 - Representan un obstáculo para las máquinas que realizan las labores agrícolas.
4. El costo por razones de mantenimiento es superior debido a los problemas de erosión y a las malas hierbas.
 5. Su construcción y mantenimiento se dificulta para profundidades mayores a 1.5 m. y en terrenos llanos y con poca profundidad efectiva.
 6. No es efectivo para terrenos con cultivos rotativos.

Ventajas del drenaje subterráneo:

1. Le facilita el trabajo a las maquinas que realizan las labores agrícolas.
2. Su construcción y mantenimiento es más fácil de realizar en cualquier terreno.
3. El costo por razones de mantenimiento es menor pues con una manguera y agua ha presión se realiza la limpieza de los drenes.

Inconvenientes del drenaje subterráneo:

1. Este solo elimina el agua del manto freático.
2. Necesita mucho más pendiente longitudinal.
3. Se dificulta la realización de su inspección.

1.2.3.- Influencia del mal drenaje en las propiedades del suelo y los cultivos.

Influencia del mal drenaje en las propiedades del suelo:

El exceso de humedad afecta algunas propiedades físicas del suelo de gran importancia para el desarrollo de los cultivos, en lo que sigue se describe cómo influye esta condición en cada una de las propiedades físicas del suelo.

1. Aireación: El desplazamiento del agua hacia los espacios libres del suelo (poros), trae como consecuencia el exceso de humedad del mismo y por consiguiente disminuye el nivel de Oxígeno, esta situación influye en el comportamiento de las raíces, en las propiedades químicas del suelo y en las actividades microbianas que en él tienen lugar. La falta de oxígeno en la zona radicular trastorna la fisiología de las raíces, dificultando la absorción de agua y nutrientes y su traslado hacia las partes aéreas, todo lo cual se traduce en una disminución de los rendimientos.

2. Estructura: Este sobre humedecimiento también afecta la estructura del suelo por distintos mecanismos. Uno de ellos es a través de la Salinización, el exceso de sales suele ir asociado al mal drenaje y ocasiona en ciertas condiciones alteraciones en la estructura que pueden llegar hasta su deterioro. Otra forma de afectación es facilitando la compactación que ocasiona el paso de la maquinaria. Además es correcto plantear que en los suelos saturados el desarrollo de las raíces es menor, sobre todo en profundidad y esto indirectamente también afecta la estructura.
3. Permeabilidad: Todos los agentes que modifican la estructura tienen un efecto sobre la permeabilidad, por ejemplo. La degeneración de la estructura que puede ocurrir en suelos sódicos disminuye la permeabilidad y lo mismo ocurre con la compactación. Al mejorar el drenaje, aumenta la permeabilidad, debido a las grietas que se forman como consecuencia de la alternancia de los estados secos y húmedos y a la mayor penetración de las raíces. Este efecto mejorador de la permeabilidad es más acentuado en terrenos arcillosos.
4. Textura: Más que una relación causa-efecto existe una relación de coincidencia, con mucha frecuencia se ven coincidir las texturas arcillosas con áreas mal drenadas y la razón es la siguiente. Las partículas finas arrastradas por el agua de escorrentía se depositan en las áreas donde el agua pierde velocidad (lagunas, valles, deltas y otras zonas bajas) en las cuales el drenaje siempre se verá afectado por la Topografía. Del mismo modo que el mal drenaje tiene poco efecto sobre la textura, la mejora del drenaje tampoco tiene prácticamente consecuencias sobre esa propiedad del suelo (un suelo arenoso lo continuará siendo después de drenado).
5. Temperatura: Los suelos húmedos tardan más tiempo que los secos en calentarse, pudiendo haber entre ellos diferencias de hasta 5 °C en igualdad de las restantes condiciones, en climas con estación fría los terrenos húmedos tardan más en calentarse, esto retrasa la germinación de las semillas y en consecuencia su siembra y cosecha se realizan más tarde. En climas cálidos la menor temperatura de los suelos húmedos puede ser una condición favorable.

Influencia del mal drenaje en el desarrollo de los cultivos:

En los párrafos anteriores se ha visto en que forma el exceso de humedad afecta algunas propiedades del suelo, lo que a su vez repercute sobre el desarrollo de las plantas. La

alteración que más afecta a los cultivos es la disminución de la aireación, por su efecto directo sobre la respiración de las raíces y porque indirectamente modifica las actividades microbianas.

1. Aireación del suelo y fisiología de las raíces: El normal desarrollo de las actividades fisiológicas de las raíces (respiración, absorción del agua y nutrientes, etc.) requiere la presencia de Oxígeno en el suelo que es consumido por éstas produciendo CO_2 , este Oxígeno del suelo se puede encontrar en estado gaseoso (como parte de la atmósfera del suelo) o disuelto en la solución del suelo. En un medio bien aireado, la atmósfera del suelo (el aire que ocupa los poros no llenos de agua) tiene una composición algo diferente a la de la atmósfera libre. El contenido de CO_2 de la atmósfera libre es menor que en el aire del suelo, en el suelo cuando el CO_2 aumenta el O_2 disminuye.

En la solución del suelo el contenido de O_2 es mucho menor que en la atmósfera del suelo, al contrario ocurre con el CO_2 . En la renovación del O_2 consumido por las plantas es de mayor importancia el O_2 de la atmósfera del suelo que el disuelto en las soluciones. Es importante conocer que en suelos con mal drenaje la respiración de las raíces se ve muy dificultada, los macroporos donde normalmente existiría aire, están ocupados por el agua, al principio las raíces consumen el aire atrapado en el agua del suelo el cual no es expulsado totalmente; así mismo utilizan el O_2 disuelto. Esto explica porque las plantas resisten un tiempo (1 ó 2 días) en los suelos saturados sin detrimento de los rendimientos, pero cuando el O_2 disponible disminuye por debajo de unos niveles que son distintos para cada planta, las raíces disminuyen su actividad respiratoria y por consiguiente sus actividades fisiológicas con las siguientes consecuencias:

- a) Disminuye la absorción de iones K, N, P_2O_5 , Ca y Mg.
- b) Disminuye el transporte de estos iones hacia las partes altas.
- c) Disminuye la absorción de agua.

Algunas plantas tienen una elevada resistencia al exceso de humedad debido a que disponen de mecanismos que aseguran la respiración de las raíces en esas difíciles condiciones. Por ejemplo, el Fresno y el Álamo prosperan en condiciones de inundación con tal que se trate de aguas frías, renovadas y desprovistas de materia orgánica, ello es posible por la elevada capacidad de estos árboles de absorber el oxígeno disuelto. A veces la resistencia a la asfixia es debida a ciertas adaptaciones morfológicas, un caso

típico es el arroz, esta planta posee espacios intercelulares que constituyen verdaderos canales que comunican las partes aéreas con las raíces. A través de estos canales el oxígeno absorbido por las hojas es conducido a las raíces que de esta manera pueden respirar normalmente.

2. Alteraciones en las actividades microbianas: Con la disminución del contenido de oxígeno la microflora aerobia desaparece gradualmente, siendo sustituida por microorganismos anaerobios cuyas actividades tienen los siguientes efectos:

d) Algunas sustancias son reducidas, entre ellas el Fe y el Mn las cuales pasan a formas más solubles y pueden producir efectos tóxicos, por ejemplo la Alfalfa es sensible al Mn disuelto así mismo el exceso de Mn induce necrosis foliar en Manzanas y Perales. Algunas sales de Fe reducido como el SFe provocan en el suelo el color gris azulado característico de los suelos mal drenados. Otro producto resultante de la anaerobiosis es el CH₄ Metano o gas de los pantanos.

e) La cantidad de Nitrógeno asimilable disminuye por dos motivos:

a) La descomposición de la materia orgánica disminuye en condiciones anaerobias liberando por tanto menos oxígeno mineral.

b) Aunque algunos microorganismos anaerobios pueden fijar pequeñas cantidades de Nitrógeno atmosférico la fijación es realizada mucho más intensamente por especies aerobias como el Azotobacter.

En consecuencia el NO₃ existente en el suelo se reduce progresivamente hasta convertirse en forma gaseosa (Nitrógeno) y escapar fácilmente del suelo. La disminución de Nitrógeno asimilable ocasiona reducciones fuertes en las producciones que sólo pueden ser compensadas mediante la aplicación de abonos nitrogenados.

3. Enfermedades: La humedad del suelo afecta de forma distinta a los agentes de enfermedades de las plantas, en general el exceso de humedad favorece, aunque a veces ocurre lo contrario, por ejemplo la inundación en los campos de arroz destruye ciertos Hongos y Nematodos perjudiciales. Con frecuencia en las áreas mal drenadas existen charcas, lagunas, etc. que constituyen focos de enfermedades no sólo para las plantas sino también para los animales y el hombre.

I.2.4- Prácticas agrícolas contra la salinidad.

La solución definitiva del problema de la salinidad consiste en la recuperación de los suelos afectados mediante la aplicación de enmiendas químicas y/o la aplicación de técnicas de lavado y/o recuperación de suelos salinos, sin embargo existen una serie de prácticas agrícolas que ayudan a disminuir los efectos nocivos de las sales y que son de aplicación en los suelos no recuperados o en la fase de recuperación, que a veces dura varios años:

1. Elección de cultivos: En lo que sigue se presenta una relación de cultivos y su tolerancia a la salinidad, la misma permite elegir las especies que técnicamente se adapten a cada condición en particular.
2. Mejora de la resistencia de las plantas a la salinidad: En este sentido se puede citar la posibilidad de obtener variedades resistentes por medio de la selección artificial, cruzamiento intervarietal e hibridación. Existen otras que no son consideradas como prácticas agrícolas pero que si aumentan la tolerancia de las plantas a la salinidad como: Tratamiento de semillas con agua salada antes de sembrarlas, vernalización en soluciones nutritivas y tratamiento con ciertos inhibidores del crecimiento.
3. Abonado: Se refiere al empleo de abonos de sales poco solubles, abonos orgánicos, foliares y otras.
4. Métodos y prácticas de riego: De los 4 métodos de riego el de subirrigación debe desecharse cuando hay problemas de sales. El riego superficial presenta las siguientes ventajas sobre el de aspersión en el caso de suelos o aguas salinas:
 - Permite lavados más energéticos.
 - La aplicación en las partes aéreas de las plantas de agua salina puede causar en las mismas ciertos perjuicios por ejemplo cuando se aplica el riego a los cítricos con agua conteniendo cloruros, se producen quemaduras en las hojas.

En cambio el Riego por aspersión tiene la ventaja de proporcionar al suelo una distribución mucho más regular de agua. En general, el riego superficial puede provocar la salinización de los suelos más fácilmente que el de aspersión, en cambio es más efectivo en la recuperación de suelos ya salinizados. De cualquier forma la salinización de suelos ocasionada por el riego depende más de un adecuado manejo del agua (sobre todo en exceso), que del sistema empleado en su aplicación.

Existen algunas prácticas de riego especialmente indicadas ante problemas de salinidad:

1. Aplicar riego con mayor frecuencia y menor dosis de lo que se haría sino hubiese problemas de sales, de esta forma el suelo no se aparta mucho de su C_c y por tanto las sales no alcanzan una concentración excesiva.(Riego Localizado)
2. A continuación de una lluvia ligera es recomendable aplicar agua de riego con objeto de lavar las sales del sistema radical.
3. En el riego superficial por surcos no es recomendable sembrar en la cumbre del camellón. Si la planta lo permite, entonces se puede sembrar en el fondo del surco y sino en los laterales.

En la figura siguiente se muestra como el lavado en riego por surcos o bandas, no afecta los camellones, donde se acumulan las sales por capilaridad. También es factible establecer una rotación de cultivos que permita alternar el riego por surcos con otras técnicas superficiales. Si la medida anterior no resultara convenientemente económica, cada varias cosechas se deben desplazar los surcos al construirlos de nuevo, de manera que los camellones no ocupen siempre la misma franja de tierra.

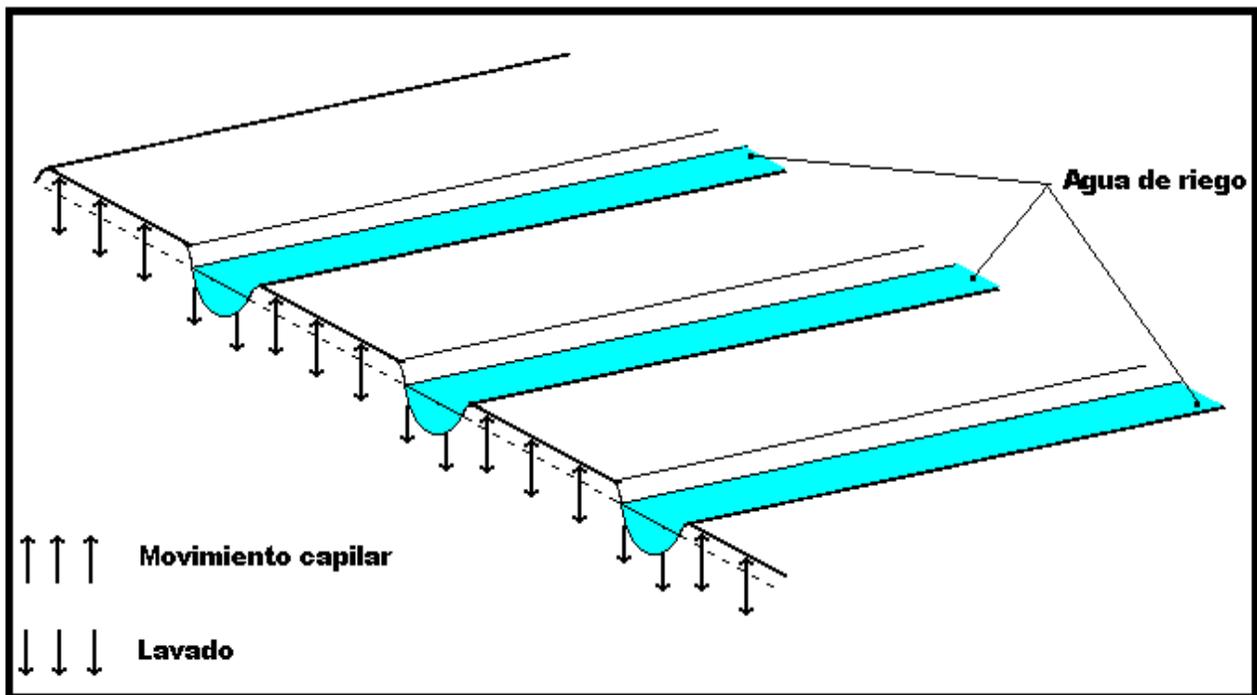


Figura 1.- Distribución de las sales en el riego por surcos o bandas. (Pizarro, 1985)

El riego localizado presenta ciertas peculiaridades en relación con la salinidad, (la Figura 2 muestra esquemáticamente la zona de concentración de las sales). La alta frecuencia mantiene altos los niveles de humedad y en consecuencia la concentración de las sales es mínima, esto representa una ventaja contra la salinidad. Sin embargo la distribución de sales en estos sistemas conlleva a no detener el riego en caso de lluvias (al menos al principio) y establecer riegos complementarios con aspersión portátil en ausencias prolongadas de lluvias y riesgos de salinidad en el suelo. Por esta razón se considera que es poco eficiente para el lavado de sales.

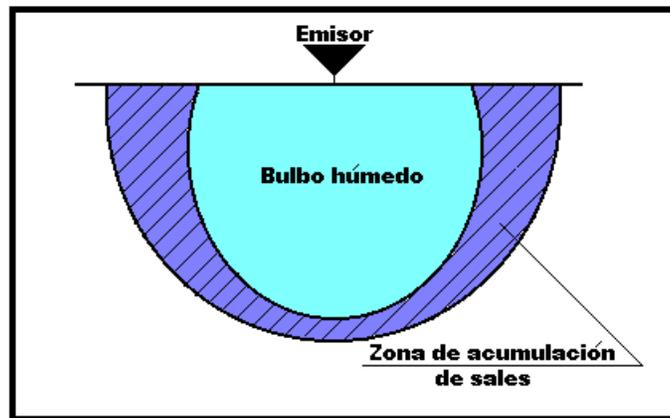


Figura 2.- Distribución de las sales en el Riego Localizado. (Pizarro, 1985)

Prácticas culturales en suelos mal drenados.

La solución ideal de un suelo con exceso de agua consiste en la instalación de un sistema de drenaje adecuado, en muchos casos las obras necesarias no se pueden incluir dentro de las prácticas culturales pero a veces es suficiente con las mejoras del drenaje superficial lo cual puede ser realizado por los agricultores, abriendo zanjas, perfilando el terreno, etc., pero aparte de estos trabajos existen unas prácticas culturales que disminuyen el efecto perjudicial del mal drenaje, estas pueden ser:

1. Selección adecuada de los cultivos.
2. Empleo de abonos nitrogenados en forma de nitratos.
3. Reducir las dosis de riego, excepto cuando exista el riesgo de aguas freáticas salinas.
4. Realizar cuidadosamente las labores agrícolas.
5. Subsolación.
6. Realizar las labores inmediatamente después de la cosecha.

I.3.- Fundamentos teóricos del diseño.

Sistemas de Drenaje Superficial:

En zonas llanas, donde la pendiente generalmente es inferior al 0.5%, suelen presentarse encharcamientos, si la infiltración del suelo es inferior a la precipitación acumulada en un cierto periodo de tiempo, o si la infiltración básica es menor que la intensidad de lluvia. Esta situación se presenta frecuentemente en los suelos de textura muy fina o en aquellos que presentan costras superficiales debido al deterioro de la estructura.

Para mejorar las condiciones del drenaje superficial de una zona llana el primer paso es sistematizar el terreno para dotarlo de una pendiente uniforme hacia los drenes de parcela, que van a conducir el agua hacia los colectores de la red principal, la sistematización también tiene como objeto suprimir aquellas depresiones donde se acumula el agua temporalmente.

En el diseño de un sistema de drenaje superficial, aún en zonas llanas, no solamente hay que considerar la evacuación del agua, sino que esta no produzca erosión, por lo que la pendiente de diseño debe proporcionar una velocidad del agua permisible según el tipo de suelo. Asimismo, para evitar la erosión de los taludes de los colectores es imprescindible dotar a los sistemas de estructuras de salida, que permitan que el agua de drenaje fluya directamente sobre la lámina de agua del dren colector.

Caudal a eliminar.

El caudal a eliminar por el sistema de desagües superficiales tiene las siguientes procedencias:

1. Pérdidas superficiales del riego.
2. Agua de drenaje subterráneo.
3. Escorrentía originada por la lluvia.

Por otra parte el buen funcionamiento de los desagües hace que estos tengan que satisfacer principalmente dos exigencias:

- a. En condiciones normales, la lámina de agua en los desagües debe estar por debajo de la salida de los drenes subterráneos, con un resguardo de seguridad de hasta 20 cm.
- b. Cuando ocurra una lluvia excepcionalmente fuerte, se puede permitir que la lámina de agua supere a los drenes, siempre que sea por un tiempo limitado. En este caso la

sección total del desagüe ha de tener capacidad para eliminar la escorrentía correspondiente.

Lo anteriormente expuesto conlleva a considerar dos caudales distintos cuando se va a diseñar un sistema de drenaje superficial:

- I. CAUDAL BASE que es el que debe ser eliminado en condiciones normales.
- II. ESCORRENTIA SUPERFICIAL debida a la lluvia que se defina como crítica.

El Caudal Base tiene unos componentes distintos según se trate de la época de riego o de la época de lluvias. En la práctica del diseño en Cuba no se considera el Caudal Base, en unos casos porque los datos son de muy difícil adquisición y en otros porque los valores son despreciables en comparación con los obtenidos en el cálculo de la escorrentía superficial, el cual considera la lámina de lluvia crítica al 10% de probabilidad de ocurrencia, valor considerado apropiado para la Agricultura en Cuba y que propicia dimensiones viables de las secciones de los desagües

Para el cálculo de la Escorrentía Superficial se pueden utilizar dos métodos, uno que es el menos riguroso y que utiliza el mapa de las Isoyetas de la lluvia máxima diaria de todo el país para el 1% de probabilidad. Este método tiene el inconveniente de la escala, pues para el trabajo de proyectos se deben utilizar escalas mayores a las que usualmente aparecen publicadas. El segundo método presenta mayor rigor en los resultados y es el que se recomienda en la actualidad, utiliza determinados coeficiente de transformación y corrección que permiten estimar la lámina máxima diaria para la probabilidad de diseño y finalmente obtener el componente del caudal a evacuar por la red de canales.

En las regiones donde se cuentan con registros confiables de lluvias obtenidos por medio de Pluviógrafos, lo más conveniente es encontrar la relación que define el comportamiento de la intensidad de la lluvia (mm/h) con su duración en (min), para diferentes frecuencias de ocurrencia en años. Muchos de estos estudios se basan en relaciones que tienen la forma matemática siguiente:

$$I = \frac{a}{(t + b)^n} \quad (1)$$

Donde:

I → Intensidad de la lluvia (mm/h) para una probabilidad de ocurrencia o frecuencia determinada.

t → tiempo de duración de la lluvia para el caso Tiempo de Concentración (min).

a y b → parámetros adimensionales que caracterizan la región climática estudiada y la frecuencia con que ocurre cada lluvia.

n → exponente muy cercano al valor de 1.

De lo hasta aquí escrito se concluye que utilizando el gráfico de IFD propuesto para la localidad donde se realizará el proyecto de drenaje, se puede obtener la lámina máxima diaria a la probabilidad de diseño que será utilizada en el cálculo del caudal a evacuar, la misma deberá ser corregida por los diferentes coeficientes anteriormente descritos. Antes de seguir es conveniente aclarar dos cosas importantes:

1. En la actualidad las curvas IFD para cada provincia del país fueron construidas en su mayoría por el Departamento Técnico de la instancia del INRH correspondiente, en ausencia de estas curvas el cálculo deberá hacerse utilizando el mapa Isoyético.
2. Para utilizar las curvas IFD es necesario primeramente determinar el tiempo de concentración, el mismo se puede obtener gráficamente o por algunas ecuaciones empíricas propuestas para determinados casos. Para evitar las inexactitudes que se introducen en la lectura del gráfico, se han encontrado utilizando el Software Stadhgraphic Plus 5.1, las ecuaciones que más se ajustan a las curvas propuestas en el gráfico. Las mismas se representan a continuación:

Se denomina tiempo de concentración al tiempo transcurrido desde que una gota de lluvia cae en el punto más alejado de la cuenca hasta que llega a la sección de control que bien pudiera ser un canal de drenaje. Para calcular el tiempo de concentración cuando se trata de un campo o parcela de riego se recomienda dividir el mismo en dos componentes, $T_C =$ tiempo de entrada + tiempo de recorrido. Para cuencas de uso agrícola y menores de 20 km², Vigoa (2000) plantea que se puede utilizar el gráfico confeccionado por Luthin, para determinar el tiempo de concentración para diferentes pendientes y condiciones de superficie. Cuando se trata de cuencas más grandes se utilizan fórmulas empíricas de otros autores

Una vez obtenida la lámina máxima diaria a la probabilidad deseada por cualquiera de los métodos mencionados anteriormente se puede calcular la esorrentía superficial, (el caudal a evacuar por el drenaje). Partiendo del método racional se ha llegado a la expresión que permite el cálculo de la esorrentía, con el supuesto de permitir condiciones de inundación

en función del cultivo que se quiere proteger. Esta suposición no tiene en cuenta el factor ecológico en el análisis de este problema ya que no evacua los excesos de agua de forma instantánea como se prevé cuando se diseñan estos sistemas para proteger poblaciones o industrias en lugar de cultivos. De aquí que las perspectivas sean las de utilizar la fórmula racional propiamente planteada, para determinar el caudal de escurrimiento en el drenaje agrícola. Al no ser esta una decisión tomada, el procedimiento de diseño descrito no tiene en cuenta este aspecto.

Cálculo del gasto del escurrimiento:

Las obras de drenaje agrícola son diseñadas para evacuar todo el gasto del escurrimiento según se vaya produciendo. En la fórmula racional, el gasto específico o módulo de escurrimiento máximo sería:

$$q_m = C \times I \times 2.78 \quad (2)$$

Si no se permite inundación, como cuando se protegen edificaciones sociales o instalaciones industriales, el gasto se calcula para evacuar el ritmo de escurrimiento que se produce en el intervalo de la intensidad máxima de la lluvia:

$$Q = q_m \times A \quad (3)$$

Cuando el proyecto se realiza permitiendo un cierto tiempo de inundación, como en el caso de los diseños de los actuales sistemas de drenaje agrícola, el escurrimiento se evacua a un ritmo menor que el que se va produciendo, lo que quiere decir que el módulo de escurrimiento se transforma en el módulo de drenaje (q_d) el cual se calcula con la siguiente expresión:

$$q_d = C \times \frac{Lp(10\%p)}{Te} \times 2.78 \quad (4)$$

Donde:

Lp → Es la lámina de lluvia para 24 h, según la probabilidad de cálculo seleccionada (mm).

Te → Es el tiempo de evacuación del escurrimiento (h).

C → Es el coeficiente de escurrimiento (adimensional).

El tiempo de evacuación del escurrimiento o tiempo de resistencia del cultivo a la inundación debe ser investigado para cada cultivo bajo determinadas condiciones de suelo y clima.

Coeficiente de escurrimiento:

Para la determinación del valor de C hay que distinguir dos casos, según que la zona sea llana o accidentada. Se considera llana una zona cuando las pendientes medidas son inferiores al 3 %. Las zonas llanas han sido mejor estudiadas por lo que en ellas se puede calcular C con mayor exactitud. En zonas accidentadas el valor de C se obtiene mediante tablas, propuestas por USDA y que son referidas en los Anexos. En cuencas que se componen de superficies de distintas características, es preciso hallar la media ponderada.

Método del número de la curva:

El valor de C se puede determinar por el “método del Número de la curva” elaborado por el US. Soil Conservation Service. Según este método el valor de C no es constante para cada cuenca sino que varía con la cuantía de la precipitación.

La selección de la probabilidad de diseño está ligada a un análisis económico-social. En el caso del Drenaje Agrícola, si las obras se proyectan para proteger solamente a los cultivos de la inundación, se acostumbra a trabajar con frecuencia de una vez cada 2, 5, 10 o 20 años, en dependencia de la importancia económica del cultivo. Sin embargo se ha probado que el valor de C para las mismas condiciones del suelo, topografía y vegetación no es constante, sino que varía con la magnitud de la lluvia, aumentando en la medida que lo hace esta, en los anexos, en las tablas 1.3 y 1.4 se plasmó lo expresado anteriormente.

Método del Número de la Curva para zonas llanas (pendientes iguales o menores de 3%), de amplia aplicación en muchos países y que exponemos a continuación.

Si se representa la variación entre la magnitud de la lluvia en forma de lámina (L) y el escurrimiento que se va produciendo (E). De acuerdo con la definición del coeficiente de escurrimiento, $C = \frac{E}{L}$, el término (i) representa la intercepción inicial: en cada punto de la curva el valor (L-E) es la cantidad de lluvia retenida por la cuenca, cuyo valor máximo potencial es S. Entre (i) y S se ha encontrado la correlación siguiente:

$$E = \frac{(L-i)^2}{L+S-i} = \frac{(L-n*S)^2}{L+S(1-n)} \quad \text{Válida para } i < L < E + S \quad (1)$$

Por lo tanto:

$$C = \frac{E}{L} = \frac{(L-n*S)^2}{L^2 + L*S(1-n)} \quad (2)$$

Se aprecia que el valor de C varía de forma importante con el valor de la lluvia de cálculo; sin embargo, para poder utilizar esa expresión, es necesario conocer la retención máxima potencial de la cuenca S.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

Los valores de CN dependen de las características de la cuenca considerada (tipo de suelo, humedad previa a la lluvia, tipo de cultivo y forma de siembra, etc.). Para ubicar el tipo de suelo, se han definido las cuatro clases hidrológicas que aparecen en la tabla 1.5 de los anexos. La humedad previa a la lluvia de cálculo, se establece en la tabla 1.7 en los anexos. El procedimiento se basa en calcular los valores de C y N suponiendo que la zona pertenece a la categoría II de humedad previa, si la densidad es alta el estafo es malo y si la densidad y el tipo de vegetación facilitan el escurrimiento, el estado es bueno. Una vez que se conoce el valor de CN para la categoría II se determina el valor correspondiente empleando la tabla 1.9 reflejada en los anexos, mientras mayor es el valor de CN menor es el valor de S, y mayor el del coeficiente de escurrimiento C, es decir, valores de CN altos indican que el escurrimiento es elevado en la cuenca y que la infiltración es baja.

Ejemplo:

Calcular el coeficiente de escurrimiento en una zona agrícola, relativamente llana, sembrada de viandas. El suelo es de tipo medio arcilloso y se puede considerar que la humedad previa es de categoría III. Para ello es necesario consultar el anexo 3.

Solución:

Si se utiliza la tabla 1.4 que aparece en los anexos.

Según las condiciones de escurrimiento planteadas, se trata de la condición 3; Suelo poco permeable, relativamente llano (0.30-0.50). Como el suelo tiene textura media, el valor de C en este intervalo tiende a ser intermedio, pero como se trata de un cultivo surcado, en hileras, de vegetación media, características que facilitan el escurrimiento, el valor de C tiende a 0.50. Por estas razones seleccionamos $C=0.50$.

Si se aplica el método de la curva:

Se ubica en la clase hidrológica C en la tabla 1.5 que aparece en anexos, se selecciona cultivos en surcos en estado bueno, a lo que corresponde un valor de $CNI=88$ de la tabla 1.8 que aparece en los anexos.

A este valor le corresponde CN=95, según la tabla 1.9 citada en los anexos, se tiene en cuenta que la humedad previa es de categoría III.

Para determinar el valor de C, hace falta definir la lluvia de cálculo (L) y después aplicar la fórmula (3.16 Vigoa), en la cual se considera un valor de n= 0,3:

Si se supone una lluvia de 20mm:

$$C = \frac{(20-0.3 \times 13.37)^2}{20(20+0.7 \times 13.37)} = 0.43 \quad (4)$$

Para una lluvia de 50mm:

$$C = \frac{(50-0.3 \times 13.37)^2}{50(50+0.7 \times 13.37)} = 0.71 \quad (5)$$

Y si fuera una lluvia de 100mm:

$$C = \frac{(100-0.3 \times 13.37)^2}{100(100+0.7 \times 13.37)} = 0.84 \quad (6)$$

Lo anterior evidencia que para iguales condiciones de suelos, topografía y vegetación, el valor de C va aumentando significativamente con la cantidad de lluvia caída, cuestión de gran importancia en las regiones de clima húmedo como Cuba (altos valores de lluvia de cálculo) cuando se selecciona el valor de C.

Sistemas de Drenaje Subsuperficial.

Profundidad óptima de la capa freática para cada cultivo.

Este es un dato fundamental para el diseño de un sistema de drenaje subterráneo, ya que en función de este parámetro se calcula la profundidad de los drenes o zanjias, su espaciamiento y el diámetro o sección. Sin embargo es un tema sobre el cual los conocimientos distan mucho de ser definitivos, debido por una parte a la complejidad fisiológica del fenómeno y por otra a la interacción de factores de tipo económicos y técnicos.

Para empezar a aproximarse al problema habría que distinguir dos situaciones:

1.- Cultivos cuyas necesidades hídricas son satisfechas al menos parcialmente, por la aportación capilar procedente de la capa freática. Esta situación es frecuente en terrenos no regados de países húmedos y en este caso una profundidad excesiva de la capa freática (aunque tenga el efecto favorable de mejorar la aireación), puede provocar escasez de agua en la zona radicular.

2.- Cultivos que no necesitan aporte capilar debido a la garantía del riego o al peligro de contaminación por Salinización. Aquí es claro que cuanto mayor sea la profundidad de la capa freática menos perjuicios causará en los cultivos.

Desde el punto de vista técnico se podría definir la profundidad óptima de la capa freática como aquella que no ocasiona reducción en los rendimientos de los cultivos, sin embargo en muchos casos la instalación de un sistema de drenaje que asegure dicha condición sería antieconómica y entonces se prefiere renunciar al máximo de los rendimientos a cambio de abaratar la solución de drenaje. En este caso la profundidad óptima sería la que dé lugar a una mayor relación beneficio / costo.

En esto radica la primera dificultad al tratar de definir la profundidad óptima. Por otra parte no se dispone de datos suficientes que permitan conocer la disminución de las producciones causadas en los cultivos por los diferentes niveles freáticos, así mismo en el problema intervienen los precios futuros de los cultivos, sus gastos de producción, etc., que con frecuencia son difíciles de predecir. Por otra parte, el costo de las obras de drenaje varía mucho de un lugar a otro y sobre todo es difícil prever las variaciones futuras de ese coste en el que intervienen máquinas en continuo perfeccionamiento y materiales sujetos a grandes variaciones de precio.

A todo esto se añade, que la profundidad óptima desde el punto de vista técnico varía con la fase del ciclo de la planta, (ya que varía la profundidad de sus raíces o su tolerancia a la salinidad) y que la capa freática no se mantiene estable, sino que experimenta variaciones después de una lluvia o riego. Sin olvidar que cuando interviene la capilaridad aportando sales el problema se complica, no obstante estas dificultades, la experiencia aporta algunos datos, los mismos se refieren en las tablas que se anexan.

Criterios Agronómicos de Drenaje.

Ya se han referido algunas cifras sobre la profundidad óptima de la capa freática para cada cultivo, según estas cifras el objetivo de un sistema de drenaje subterráneo donde se va a cultivar por ejemplo papas, es mantener la capa freática a una profundidad de 60 cm, sin embargo en la práctica es imposible mantener estático el nivel freático después de las aportaciones de la lluvia o el riego o bien cuando estas no ocurran. Esto conlleva a los Criterios Agronómicos de Drenaje: Criterio de la época de riego y de la época de lluvias.

Criterio de época de riego: Cuando se aplica un riego la mayor parte del agua infiltrada es retenida por el suelo, que eleva su contenido de humedad normalmente hasta alcanzar la capacidad de campo. El exceso intencionado o inevitable de agua infiltrada eleva el nivel freático hasta una altura que puede ser perjudicial. Este criterio establece, que (N) días después de aplicado un riego la capa freática deberá haber descendido hasta una profundidad (p) donde los valores de (N y p) dependen sobre todo del tipo de cultivo.

Normalmente se utiliza el valor de (N = 3 días) aunque en ciertos casos son más adecuados los valores de (N = 2 ó 4 días), el menor para los cultivos más sensibles al exceso de humedad. En cuanto a (p), se puede tomar el valor correspondiente al 80 % de las raíces. La tabla 1.13 que se anexa sugiere valores de la profundidad freática apropiados para algunos cultivos en función de la textura del suelo.

Criterio de época de lluvias: Durante la época de lluvias, la capa freática está sometida a una serie de oscilaciones que dependen de la ocurrencia y cuantía de las precipitaciones, cada nivel freático se alcanza un cierto número de veces, en general a niveles freáticos altos corresponde una menor frecuencia y viceversa. Se permite que como consecuencia de las precipitaciones la capa freática se eleve hasta una profundidad (p) medida desde la superficie del terreno, con una frecuencia de (N veces por año), acostumbra a utilizarse el valor N = 5 V/A.

Este criterio es muy discutible, sobre todo teóricamente, en particular el valor N = 5 V/A parece inadecuado (en principio), pues se está acostumbrado a la idea de tolerar una pérdida de cosecha o disminución fuerte cada 5,8 ó 10 años, hay que decir en primer lugar que el hecho de que se alcance 5 V/A la profundidad (p) no quiere decir que la cosecha se vaya a perder 5 V/A y en segundo lugar a favor de este criterio se puede decir que su aplicación conduce a buenos resultados prácticos. La tabla ## de anexos refiere valores orientativos de la profundidad de la capa freática permisible, 5 días después de la lluvia, para distintas clases de cultivo.

A pesar de que estos problemas son diferentes al igual que sus soluciones, pueden tener como punto de partida análisis teóricos comunes, en este caso el estudio del movimiento del agua en el suelo para controlar los niveles freáticos. En este sentido el tratamiento matemático que se utilice para fundamentar la solución del problema, será siempre una aproximación al problema real, dado que los estudios del sistema suelo – agua no están

rigurosamente finalizados en la actualidad, y en la mayoría de los casos se fundamentan en criterios prácticos obtenidos en la práctica experimental.

El estudio del movimiento del agua en el suelo y de las oscilaciones de la capa freática está basado en la ley de conservación de la masa y en la ley de Darcy. Este último, probó que el flujo de agua a través de un medio poroso varía con el gradiente hidráulico entre dos puntos considerados.

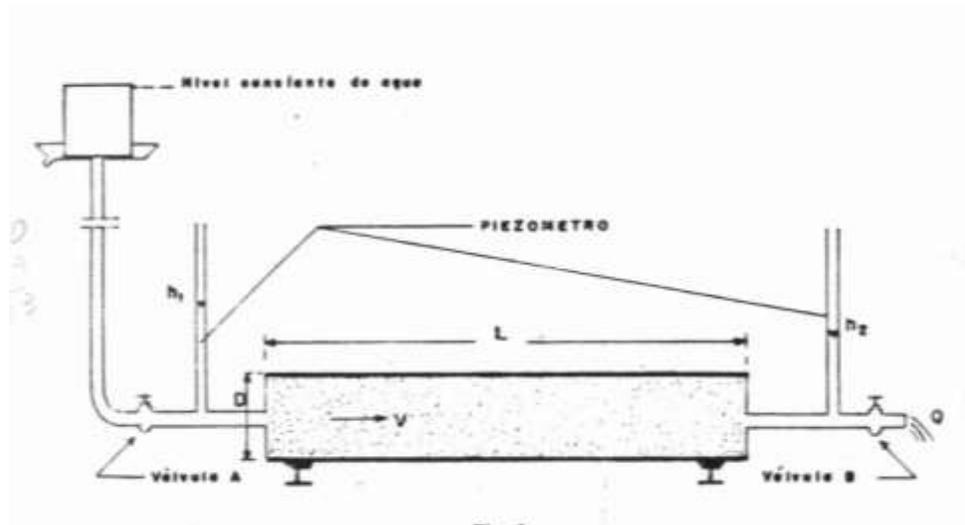


Figura3. Experimento de Darcy. (Vigoa 2000)

$$V = K \times \frac{\Delta H}{L} = K \times i \quad (7)$$

Donde:

$V \rightarrow$ es la velocidad horizontal en el medio poroso.

$i \rightarrow$ es el gradiente hidráulico entre dos puntos del medio poroso.

$K \rightarrow$ es un coeficiente característico de los medios porosos llamado permeabilidad o conductividad hidráulica.

El gasto sería entonces:

$$Q = V \times A = K \times i \times A \quad (8)$$

Donde:

$A \rightarrow$ es el área de la sección transversal que atraviesa el flujo horizontal.

Sin embargo un análisis matemático riguroso, deducido de este estudio, conduce a ecuaciones muy complicadas para el trabajo práctico; de aquí que ha sido necesario introducir algunas hipótesis para poder simplificar estas ecuaciones.

Hipótesis aceptadas:

1. El suelo es homogéneo y de conductividad hidráulica constante K.
2. Para pequeñas inclinaciones de la capa freática las líneas de flujo son horizontales (Jules Dupuit, Francia, 1863).
3. Siempre se cumple la ley de Darcy en una misma sección vertical (Dupuit).
4. El gradiente hidráulico en cualquier punto del flujo es igual a la pendiente de la capa freática sobre dicho punto (Dupuit – Forcheimer, Alemania, 1914).
5. La velocidad de penetración del agua en los drenes (descarga específica del acuífero) es constante (régimen permanente).
6. Los drenes son paralelos, espaciados a una distancia E.
7. Existe siempre un estrato considerado impermeable, a una profundidad (d) por debajo de los drenes.

Fórmulas a considerar:

Las fórmulas que se utilizan para diseñar un sistema de drenaje subterráneo establece una relación matemática entre la teoría del movimiento del agua en el suelo y los elementos que conforman el sistema de drenaje (espaciamiento y profundidad de los drenes, características y magnitud del agua a evacuar, características del cultivo, las tuberías a utilizar, y otros). Las mismas se pueden agrupar según se considere o no, un equilibrio entre la cantidad de agua que penetra en el suelo y la que es evacuada a través de los drenes, es decir:

1. Fórmula del régimen permanente.
2. Fórmula del régimen variable.

Las fórmulas del régimen permanente suponen que la capa freática tiene un nivel constante, es decir, el agua aportada al terreno (de lluvia o de riego) tiene una característica tal que para determinada profundidad y espaciamiento entre drenes, la capa freática no aumenta por encima del nivel supuesto (el apropiado para el cultivo), o lo que es igual, la intensidad de la recarga igual al ritmo de evacuación del agua por los drenes. Es por ello a estas fórmulas se le imponen como constantes (datos): *El caudal a eliminar y la profundidad a que se estabiliza la capa freática*. Estas aproximaciones ofrecen resultados aceptables en regiones caracterizadas por pluviométricas de baja intensidad o terrenos agrícolas bajo riego superficial y además tienen la ventaja de facilitar la mejor comprensión de las técnicas

de drenaje subterráneo, así como un mejor entendimiento de las fórmulas del régimen variable.

Las fórmulas del régimen variable en cambio tienen en cuenta una alimentación no uniforme de la capa freática y como consecuencia la variación del nivel de esta es decir que para el cálculo de la separación entre drenes, consideran el movimiento de la capa freática durante la recarga del suelo y durante la descarga de este a través de los drenes.

Las fórmulas del régimen impermanente permiten interpretar más rigurosamente la realidad sobre el movimiento de agua hacia los drenes, fundamentalmente si se trata de regiones muy húmedas donde las causas principales del drenaje son lluvias de alta intensidad o zonas con suelos salinizados o con peligro de salinizarse, que requieren de riegos abundantes (riego por aspersión) para el lavado y eliminación de sales.

A pesar de las limitaciones señaladas a las fórmulas del régimen permanente, el análisis de este permite generalizar aspectos cualitativos, que son válidos para cualquier sistema de drenaje, incluyendo la ocurrencia del régimen impermanente:

1. Para un mismo suelo homogéneo a mayor profundidad de los drenes corresponde un mayor espaciamiento entre ellos.
2. A mayor permeabilidad del suelo, mayor podrá ser el espaciamiento entre drenes.
3. Los drenes se deben colocar en los estratos más permeables del suelo, donde predomina el flujo horizontal.

El movimiento del agua en el suelo, prácticamente, no tiene ninguna influencia a profundidades mayores de la cuarta parte del espaciamiento ($0.25 \times E$), medidas a partir de los drenes.

4. Para una mayor garantía del funcionamiento deseado, es recomendable disminuir el espaciamiento teórico calculado de (5 – 10%).

I.4.- Normas y Regulaciones consideradas en la práctica del diseño.

Pasos para el diseño de un sistema de drenaje superficial:

1. Aprovechar las vaguadas naturales o pequeños arroyos como colectores principales, en caso de que existan. El resto de la red debe tratar de adaptarse a este primer trazado.
2. Subdividir la zona a drenar en áreas aportantes o tributarias según la topografía del terreno, accidentes naturales o artificiales y la aerotecnia del cultivo que se planifica

sembrar. Aquí es conveniente que se indique el sentido aproximado del escurrimiento en las diferentes áreas en que se ha subdividido la zona objeto de estudio.

3. Trazar la red de drenaje.

El análisis que se plantea en este paso parte del esquema de drenaje preliminar y persigue el objetivo de dejar trazados los canales laterales o cabeceras de campo y como consecuencia de esto, los canales colectores.

El trazado de los canales laterales que conforman la red de drenaje debe hacerse coincidir con los bordes correspondientes de los campos típicos, caminos existentes, etc., lo más perpendicular posible a la dirección del escurrimiento superficial. De no existir estos, la separación entre los laterales estará en dependencia del volumen del escurrimiento que se produce y de la resistencia a la inundación del cultivo a proteger y no debe pasar de 500.0 como límite práctico.

Los vertedores se trazarán lo más perpendicular posible a los colectores secundarios y llevarán sus aguas a los colectores principales formando con estos ángulos entre 60 ° y 90 ° en planta.

4. Calcular el gasto de diseño para cada lateral, comenzando por las áreas aportantes más pequeñas. Después de calcular los gastos de diseño de todos los canales laterales, se procede a calcular el gasto de diseño de cada canal colector en función de su categoría y según vayan recibiendo el escurrimiento de otros canales de categoría inferior.

5. Realizar el proyecto hidráulico de los canales y otras obras que se deriven del sistema de drenaje planteado.

1.4.1.- Documentación para los proyectos de saneamiento agrícolas

Según (Vigoa 1998) la Información necesaria para el proyecto de un sistema de drenaje está compuesta por varios componentes. En primer lugar se debe contar con un informe hidrológico, el cual Posibilita obtener las características de las lluvias en la zona afectada, para diferentes posibilidades. De esta información se requiere, para cada frecuencia, la intensidad de la lluvia, la duración y las láminas que originan. El informe hidrológico debe permitir evaluar los coeficientes de escurrimiento que se deben adoptar en los cálculos de los gastos de diseño para cada obra del sistema. Se debe tener en cuenta el levantamiento topográfico, donde su escala depende del relieve predominante, para terrenos ondulados (1:10000 y equidistancia a 1m), para terrenos llanos (1:5000 y equidistancia a 0.5m).Los

levantamientos topográficos deben ser completados con detalles de las depresiones del terreno, obras de fábricas, arroyos, u otros accidentes naturales o artificiales que existan en la zona de estudio. Además se realiza el levantamiento geotécnico para conocer la profundidad de yacencia de la roca y su perfil litológico en las zonas de posible trazado de los canales. Por otra parte está el levantamiento de los suelos, que predomina en el área de objeto de estudio, determinando para cada tipo de suelo: textura, porosidad y coeficiente de infiltración. Por último y no menos importante se encuentra el informe agronómico, que contempla las distancias de siembra de los cultivos, las características y dimensiones de los campos o parcelas típicas, la resistencia década cultivo a la inundación y las características de la maquinaria agrícola que debe entrar a los campos, así como la época en que esto se produce.

1.5.- Efectos Ambientales.

La consecuencia ambiental constituye un componente inseparable y entrelazado de todos los planes de manejo de proyectos actuales que involucren recursos hídricos. Tener esto en cuenta es un reto, tarea de los ingenieros y científicos, quienes están conscientes del papel social de sus profesiones. Según la lista de chequeo para el medio ambiente de ICID (ODA, 1993), las posibles áreas de impacto negativo pueden agruparse bajo 8 categorías: Hidrología, Contaminación orgánica e inorgánica, propiedad de los suelos y Efectos Salinos, Erosión y Sedimentación, Cambios Biológicos y Ecológicos, Impacto Sociocultural, Salud Humana y Desequilibrio Ecológico.

a) Hidrología: Esquemas de irrigación de aguas sumergidas, almacenadas en depósitos desde donde las facilidades de conducción las llevan hasta terrenos en la superficie del campo. El mayor componente del ciclo hidrológico es la influencia del riego y del drenaje, como el régimen de flujo de aguas del río, evaporación, infiltración, percolación, elevación por capilaridad y el flujo de aguas terrestres. Sesenta millones hectáreas por todo el mundo sufren salinización, causada por la mala irrigación (24% de toda la tierra irrigada).

b) Contaminación Orgánica e Inorgánica: Uno de los efectos negativos de la irrigación puede ser la contaminación del agua terrestre, mediante la filtración de contaminantes desde el suelo y la superficie (puede provenir de desechos de los humanos o del ganado). Los

contaminantes más comunes son los fertilizantes (principalmente nitrógeno, fósforo y potasio) y pesticidas. Estos también pueden aparecer en las superficies de desagües y causar contaminación en los canales de drenaje o en los cuerpos de agua receptores que se encuentran río abajo.

Los proyectos de irrigación también pueden, directamente o a través de procesos industriales asociados, contribuir al incremento de la emisión de gases. A escala global, el metano proveniente de los campos de arroz irrigados, está considerado como uno de los contribuyentes del efecto invernadero (5%).

c) Propiedades de los Suelos y Efectos de la Salinidad: Como se dijo antes, este está considerado como el mayor problema de impacto ambiental, debido a la irrigación y esquemas de drenajes. Comúnmente la estructura del suelo y otras características físicas y químicas resultan afectadas. Un punto de particular importancia es la intrusión de aguas salinas en áreas costeras, unido al agotamiento del agua terrestre fresca causada por la sobreexplotación, tanto para la irrigación como con fines de abastecimiento a la población. Un ejemplo es el área Metropolitana de Manila, donde el agua terrestre usada ha disminuido tan rápido que el recargo natural para los últimos treinta años fue excedido, resultando en una minimización del manto acuífero (Munasinghe, 1992).

d) Erosión y Sedimentación: Los cambios en los gradientes del terreno y en la cobertura vegetal pueden conducir a una modificación en la erosión y en la cobertura vegetal. Ambos, tanto río abajo como río arriba. Estos efectos pueden llevar a cambios en la morfología del río, sedimentación, erosión del estuario y en el relleno de humedales.

e) Cambios Biológicos y Ecológicos: La creación de redes de riego y drenaje involucran desvíos de ríos, desbordamientos, destrucción de la vegetación, etc.. Destruye hábitats previos y crea nuevos. Con esto hay pérdidas y ganancias. El efecto puede ser positivo o negativo en las especies raras que viven en los hábitats afectados por el proyecto (terrenos del proyecto, cuerpos acuáticos relacionados, áreas circundantes, valles y orillas, humedales y llanos). Así mismo, patrones de migraciones de mamíferos, aves, peces... pueden afectarse o no.

f) Impactos Socioculturales: Las repercusiones en el potencial sociocultural del proyecto de irrigación son múltiples. Son considerados los cambios poblacionales, distribución equitativa de las entradas, el papel de la mujer, el modo de vida de la minoría, cultura, herencia religiosa o arqueológica. No es coincidencia que tales resultados de encuentren en el centro de discusiones interdisciplinarias en cuanto méritos y desventajas de los proyectos de irrigación. Los planificadores de los proyectos no pueden notar muy fácil la importancia actual de estos aspectos.

g) Salud Humana: Hay tres tipos de riesgos fundamentales para la salud pública que temer a partir del desarrollo y operación de esquemas de irrigación: 1.) La aplicación de agroquímicos; 2.) Enfermedades relacionadas con el agua, estimuladas por la presión de grandes cantidades de superficies acuáticas. Muchas de ellas son llevadas por el agua (diarreas, fiebre tifoidea, etc.). Otras son transportadas por insectos o caracoles (malaria, schistosomiasis, etc.). 3.) Proviene de la concentración de personas y animales asociados con los esquemas de irrigación. En ausencia de agua limpia, sanitarios y sanidad, enfermedades como la fiebre amarilla y el cólera se pueden manifestar. Otro factor a tener en cuenta es que las enfermedades transmitidas por la rata tienden a congregarse alrededor de los establecimientos de irrigación.

h) Desequilibrio Ecológico: Cuando se desarrollan esquemas de irrigación, habrá un sacrificio inicial y continuo de vida silvestre que se desarrolla en el terreno, bosques, humedales, etc., que se hayan utilizado para la agricultura. Sin embargo, en el caso de que la vida silvestre que habita en los alrededores acuáticos (peces, especies de aves, etc.) aumente, el efecto neto es difícil de predecir.

El uso de vida salvaje reduce al mismo tiempo el potencial para el uso de métodos naturales para el control de plagas. Los pesticidas químicos sustituyen a los predadores naturales (y luego los disminuye), y lo hace de forma casual y a muy caro precio.. A medida que la biodiversidad pura se completa más, esto es así invariablemente reducido por los esquemas de irrigación y drenaje.

II.- Procedimientos para el diseño de sistemas de drenaje.

II.1.- Procedimiento para el diseño hidrológico de sistemas de drenaje superficial.

Para estimar la lámina máxima diaria para la probabilidad de diseño y finalmente obtener el componente del caudal a evacuar por la red de desagües, la práctica recomienda utilizar:

$$I = \frac{a}{(t+b)^n} \quad (1)$$

Donde:

a, b y n → Son parámetros aportados por el estudio hidrológico de la zona y cuyo contenido forma parte de la materia que se imparte en la asignatura Hidrología Superficial 1 y el tiempo de concentración (**t**) es conveniente estimarlo a partir del Nomograma de Luthin, propuesto por Vigoa (2000), el cual permite estimar el tiempo de concentración para los casos de parcelas agrícolas, en función de las características de la superficie y la distancia hasta la sección de control (m). El mismo se ofrece en la figura 4 de Anexos.

Obtenida la Intensidad de la lluvia por medio de **(1)**, el estudio que relaciona las láminas de lluvia diaria del 1% de probabilidad y las intensidades correspondiente, para diferentes tiempos de duración realizado por el hidrólogo Berdo Kochiashvili, permite encontrar valores medios de transformación válidos para obtener la lámina de diseño a partir de la Intensidad de la lluvia y que pueden ser aplicados a todo el territorio de la República de Cuba.

$$L_{10\%p} = \frac{I_{1\%p}}{Kt \times Kp \times Kr} \quad (2)$$

Donde:

$I_{1\%p}$ → Intensidad de la lluvia del 1% de probabilidad en (mm/h).

$L_{10\%p}$ Es la lámina máxima de lluvia diaria al 10% de probabilidad de ocurrencia (mm).

Kt → Coeficiente de transformación media para un intervalo de tiempo expresado en $\frac{1}{h}$. La tabla 1.5 de Anexos propone los valores correspondientes al territorio nacional, los mismos varían con el tiempo de duración de la lluvia.

Kp → Coeficiente que permite el paso de una probabilidad a otra, su utilización es válida para el caso de las lluvias que corresponden a otra frecuencia o probabilidades de ocurrencia. Vigoa (2000) propone los valores correspondientes, los mismos se presentan en la Tabla 1.6 de Anexos.

Kr → Coeficiente de reducción para diferentes zonas climáticas, fue introducido por el Especialista I. I. Truzov y un grupo de colaboradores del INRH debido a que los valores de

la intensidad de la lluvia eran mayores que los reales en la medida que se consideraban tiempo de duración de la lluvia pequeños. La tabla 1.7 de Anexos muestra los valores propuestos. El hidrólogo Orlando Pérez Monteagudo basado en la poca variabilidad del coeficiente de reducción en zonas no montañosas propone trabajar en áreas agrícolas con los valores medios de los coeficientes de reducción.

Una vez obtenida la lámina máxima diaria a la probabilidad deseada se puede calcular la esorrentía superficial, (el caudal a evacuar por el drenaje). Como el diseño se realiza permitiendo un cierto tiempo de inundación, el escurrimiento se evacua a un ritmo menor que el que se va produciendo y el módulo de drenaje se puede obtener por:

$$qd = C \times \frac{L_{10\%p}}{Te} \times 2.78 \quad (3)$$

Donde:

$L_{10\%p}$ → Es la lámina de lluvia para 24 h, en (mm) y para la probabilidad de diseño.

Te → Es el tiempo de evacuación del escurrimiento (h) o tiempo de resistencia a la inundación del cultivo, el mismo debe ser investigado para cada cultivo bajo determinadas condiciones de suelo y clima. La tabla 1.8 de Anexos propone valores para diferentes condiciones.

C → Es el coeficiente de escurrimiento (adimensional). Para la determinación del valor de C hay que distinguir dos casos, según que la zona sea llana o accidentada. Se considera llana una zona cuando las pendientes medidas son inferiores al 3 %. Las zonas llanas han sido mejor estudiadas por lo que en ellas se puede calcular C con mayor exactitud. En zonas accidentadas el valor de C se obtiene mediante las tablas 1.9 y 1.10, propuestas por USDA y que son referidas en los Anexos. En cuencas que se componen de superficies de distintas características, es preciso hallar la media ponderada.

El caudal a evacuar por el canal vertedor de drenaje (badén) se estima por medio de:

$$Qv = qd \times Ap \quad (4)$$

Donde Ap es el área neta (ha) de la parcela que se pretende drenar.

El caudal a evacuar por el canal colector, el cual tiene la función de coleccionar el escurrimiento de las parcelas de riego y que proviene de los canales vertedores que tributan a este, se estima por medio de:

$$Q_c = Q_v \times \#vertedores \quad (5)$$

El canal principal de drenaje evacua los escurrimientos provenientes de los canales colectores, se puede estimar por medio de:

$$Q_p = Q_c \times \#colectores \quad (6)$$

Finalmente aplicando la Ley de Conservación de la Masa y aplicando la ecuación de continuidad se puede calcular el volumen necesario en el receptor de drenaje en función del tiempo seleccionado para recibir todo el escurrimiento.

$$V_R = Q_p \times T_R \quad (7)$$

II.2.- Procedimiento para la programación de lavados de suelos salinos

La práctica ha convenido separar las soluciones en dos situaciones distintas:

1. Cuando en la zona radicular el contenido de sales permanece constante ($\Delta Z = 0$), y se utiliza la ecuación de equilibrio de sales para calcular las necesidades de lavado y planificar lavados de mantenimiento preferiblemente con el agua de riego.
 2. Cuando en la zona radicular el contenido de sales varía ($\Delta Z \neq 0$), y se utiliza la ecuación de almacenamiento de sales para calcular las necesidades de lavado para planificar lavados de recuperación.
1. En el primero de los casos se puede utilizar la fórmula general para solucionar la mayoría de las situaciones que se pueden presentar:

$$R = \frac{(E-P) \times C_i + (C_g - C_i) \times G}{f \times (C_{cc} - C_i)} \quad (1)$$

Donde:

R.- Es el agua de percolación o agua de lavado a evacuar (mm)

E.- Evapotranspiración anual (mm).

P.- Precipitación anual (mm).

C_i.- Salinidad del agua de riego (dS/m).

C_g.- Salinidad del agua capilar (dS/m).

G.- Aporte capilar (mm).

C_{cc}.- Salinidad en el extracto de saturación del suelo (dS/m).

f .- Eficiencia de lavado.

La salinidad en el extracto de saturación del suelo se estima mediante:

$$CEe \times \varepsilon = CEcc \times CC = CEpm \times PM \quad (1a)$$

O simplemente:

$$Ce \times \varepsilon = Ccc \times CC = Cpm \times PM \quad (1b)$$

Donde:

CEe .- Es la salinidad en el extracto de saturación del suelo (dS/m).

$CEcc$.- Es la salinidad del suelo cuando está a Capacidad de Campo (dS/m).

$CEpm$.- Es la salinidad del suelo cuando está en estado de punto de marchitez (dS/m).

ε .- Es la porosidad del suelo (%).

CC .- Es la capacidad de campo (%).

PM .- Es el punto de marchitamiento (%).

La eficiencia de lavado se comporta en función de la textura del suelo, de acuerdo con Pizarro (1985), se establecen los siguientes rangos.

Valores de f según la Textura del suelo.

TEXTURA DEL SUELO	f
Arenoso	0.90 a 1.00
Francoarcillolimoso a Francoarenoso	0.80 a 0.95
Arcilloso	0.20 a 0.60

La salinidad del agua capilar es igual a la salinidad del agua de lavado cuando no existe SEEPAGE ($Cg = Cr$) y cuando existe SEEPAGE ($Cr \leq Cg \leq Cs$). En la mayoría de los casos se puede considerar que en el equilibrio de sales ($Cg = Cr$) y Cr se estima según:

$$Cr = f \times Ccc + (1 - f) \times Ci \quad (1c)$$

A partir **(1)** se pueden calcular las necesidades de lavado (R) que hay que añadir a las necesidades de riego calculadas en función de la (E_t), para que la salinidad del suelo se estabilice a un valor determinado (C_{cc}) que depende de los cultivos a implantar. En este caso y como comprobación de las condiciones de equilibrio es necesario comprobar que la cantidad de sales que se aporta con el agua de riego es igual a la cantidad de sales que se extraen junto con al agua de lavado, para ello: $I \times Ci = R \times Cr$, donde la dosis de riego (I) suele obtenerse a partir de la ecuación de balance de humedad en la zona radicular. En el

caso inverso, cuando se conoce (R), es decir cuando se sabe qué porcentaje del agua aplicada percola, calcular el valor (Ccc) a que se estabilizará la salinidad del suelo.

2. En el segundo caso **(1)** se sustituye por la ecuación de almacenamiento de sales, la cual permite conocer la evolución de un suelo después de su puesta en riego y conocer año por año o mes por mes como va creciendo en salinidad hasta alcanzar el equilibrio:

$$\Delta Z = \frac{Ci \times (I - R + R \times f) + G \times Cg - R \times f \times \left(\frac{Z_1}{Hc}\right)}{1 + \left(\frac{R \times f}{Hc}\right)} \quad (2)$$

Donde:

ΔZ .-Es el contenido de sales en el suelo (CEmm)

I .- Agua de riego (mm).

Hc .- Es el contenido de agua en el suelo a capacidad de campo (mm).

Z_1 .- Es el contenido inicial de sales en el suelo (CEmm).

El contenido de agua en el suelo cuando está a capacidad de campo se puede calcular por:

$$Hc = Pradicular \times CC \quad (2a)$$

El contenido inicial de sales se obtiene por:

$$Z_1 = Hc \times Ccc_1 \quad (2b)$$

Donde la salinidad inicial del suelo cuando está a capacidad de campo se puede estimar

$$\text{por medio de las relaciones (1a) y (1b), así: } Ccc_1 = \frac{CEe_1 \times \varepsilon}{CC} \quad (2c)$$

La salinidad final del suelo cuando está a capacidad de campo se estima por:

$$Ccc_2 = \frac{Z_2}{Hc} \quad (2d)$$

La salinidad final en el extracto de saturación del suelo se calcula por:

$$CEe_2 = \frac{Z_2}{Hc} \quad (2f)$$

Finalmente se puede estimar la salinidad del suelo al final del programa de lavados por medio de:

$$Z_2 = Z_1 + \Delta Z \quad (3)$$

Para este caso y a diferencia del primero, el agua de lavado (R) se deduce de la ecuación de balance de humedad en la zona radicular: $(I + P + G = R + E)$

II.3- Procedimiento para el diseño hidrológico de sistemas de drenaje subterráneo

Fórmulas del régimen permanente.

Hooghoudt (Holanda, 1940) y posteriormente Ernst (Holanda, 1962) propusieron las ecuaciones actualmente utilizadas para estimar la profundidad de los drenes y el espaciamiento entre estos para garantizar las exigencias del cultivo en condiciones de régimen permanente.

Procedimiento utilizando la fórmula de Hooghoudt.

De acuerdo con Pizarro (1985), la ecuación de Hooghoudt (Holanda/1940) puede ser utilizada en los casos de zanjas verticales profundas o drenes de tubos:

$$L^2 = \frac{8K_2hd}{R} + \frac{4K_1h^2}{R} \quad (1)$$

Donde:

L → Espaciamiento entre drenes (m).

R → Percolación (m/día).

K_1 → Permeabilidad del estrato situado sobre los drenes (m/día).

K_2 → Permeabilidad del estrato situado bajo los drenes (m/día).

h → Altura de la capa freática en su punto medio, respecto al nivel de los drenes.

d → Espesor equivalente de Hooghoudt, que depende de la separación entre drenes (L), el espesor del estrato por debajo de los drenes (D) y del radio de los drenes (r).

Cuando a los efectos prácticos, se consideran que los drenes están vacíos ($h_0 = 0$) y se obtiene la ecuación de Hooghoudt simplificada para drenes de tubo o zanjas verticales:

$$L^2 = \frac{4Kh}{R} (h + 2d) \quad (1.1)$$

El término $\frac{4K_1h^2}{L^2}$ es la ecuación del flujo horizontal, por encima de los drenes; y el término

$\frac{8Kdh}{L^2}$, por lo general mucho mayor que el anterior, es la representación del flujo horizontal

por debajo de los drenes, donde el producto ($K \times d$) es la transmisibilidad del acuífero, en (m^2/d). Al aplicar la fórmula de Hooghoudt se pueden resolver los casos siguientes:

- a. Solo existe un estrato por encima de la capa impermeable. Este caso ($K_1 = K_2$) y la fórmula adopta la forma siguiente:

$$L^2 = \frac{4Kh}{R} (h + 2d) \quad (2)$$

- b. Dos estratos sobre la capa impermeable, con los drenes en la superficie de separación de esos estratos. Este es el caso de aplicación de la fórmula general.

$$L^2 = \frac{4K_1h^2}{R} + \frac{8K_2hd}{R} \quad (3)$$

- c. Dos estratos sobre la capa impermeable, con los drenes situados en el estrato profundo. En este caso se puede seguir aplicando la fórmula general, aunque no se puede asegurar su precisión, el procedimiento propuesto por Ernst es más preciso pero también más complicado. Para utilizar la fórmula general se puede calcular el valor promedio ponderado para K , lo cual también es válido si existen más de dos estratos de permeabilidad diferente, pero los drenes están situado en el estrato inferior o en la frontera entre dos estratos:

$$K_1 = \frac{L_1 \cdot K_1 + L_2 \cdot K_2}{L_1 + L_2} \quad (4)$$

- d. Dos estratos sobre la capa impermeable, con los drenes situados en el estrato superior. En este caso no se puede aplicar la fórmula de Hooghoudt y hay que recurrir a la de Ernst.

Aplicaciones de la fórmula de Hooghoudt.

Al aceptar la hipótesis de Dupuit – Forcheimer se introduce un error que fue enmendado por el propio Hooghoudt. Pues en realidad el flujo hacia el dren no es siempre horizontal, sino que en la cercanía de este (a una distancia menor de 0.7 del diámetro del dren), las líneas de corriente pasan a ser radiales, aumentando su concentración en la medida en que se acercan al dren, y por consiguiente, la resistencia del suelo al flujo. El flujo por debajo de los drenes, que ya se vio que estaba representado por la expresión siguiente: $R = \frac{8Kdh}{L^2}$, en

realidad obedece a la fórmula siguiente: $R = \frac{8Kd^1H}{E^2}$

Donde:

$d^1 \rightarrow$ Es una profundidad equivalente de los drenes al estrato impermeable, que introduce Hooghoudt para corregir la simplificación del efecto del flujo radial. Si se tiene en cuenta el flujo radial en la zona donde este ocurre, el valor de d^1 viene dado por la expresión siguiente:

$$d^1 = \frac{L}{8(R_h + R_r)} \quad y \quad R_h = \frac{(L-1.4D)^2}{8D \times L} \quad y \quad R_r = \frac{1}{\pi} \times L n \frac{0.7D}{r}$$

Donde:

r_h y $r_r \rightarrow$ Representan las resistencias del suelo al flujo horizontal y radial respectivamente.

$r_0 \rightarrow$ Es el radio del dren.

Por lo tanto, al tabular los valores de d^1 en función de E y D , para los valores más usuales de r_0 , la expresión se puede escribir: $L^2 = \frac{4Kh^2 + 8Khd^1}{R}$, que constituye la fórmula de Hooghoudt utilizada en la práctica. El procedimiento se explicará a continuación por medio de un ejemplo.

Datos:

$$K_1 = 0.25 \text{ m/d}$$

$$K_2 = 1.50 \text{ m/d}$$

$$H = 1.20 \text{ m}$$

$$D = 2.00 \text{ m}$$

$$p \text{ (profundidad óptima de la capa freática)} = 0.80 \text{ m}$$

$$R = 15 \text{ mm/d} = 0.015 \text{ m/d}$$

$$r \text{ (radio de los drenes)} 5 \text{ cm.} = 0.05 \text{ m}$$

$$h = H - P = 1.20 - 0.80 = 0.40 \text{ m.}$$

El cálculo se realiza por el procedimiento de tanteos.

Tanteando un valor de $L = 40 \text{ m}$.

De la tabla 5 página 127, Pizarro (1985), para $r = 0.005 \text{ m}$, $L = 40 \text{ m}$ y $D = 2 \text{ m}$ se obtiene el espesor equivalente de Hooghoudt: $d = 1.55 \text{ m}$.

Introduciendo los valores anteriores en la fórmula general se obtiene:

$$L^2 = 40^2 = 1600 \text{ m}^2$$

El miembro derecho de la ecuación se obtiene por:

$$\frac{4K_1h^2}{R} + \frac{8K_2hd}{R} = \frac{4 \times 0.25 \times 0.40^2}{0.015} + \frac{8 \times 1.5 \times 0.40 \times 1.55}{0.015} = 506 \text{ m}^2$$

Como $506 \lll 1600$, el valor tanteado, $L = 40 \text{ m}$ es excesivo. Para $L = 15 \text{ m}$ y manteniendo los demás parámetros el espesor equivalente de Hooghoudt: $d = 1.11 \text{ m}$, así:

$$L^2 = 15^2 = 225 \text{ m}^2$$

$$\frac{4K_1h^2}{R} + \frac{8K_2hd}{R} = \frac{4 \times 0.25 \times 0.40^2}{0.015} + \frac{8 \times 1.50 \times 0.40 \times 1.11}{0.015} = 365 \text{ m}^2$$

Como $365 > 225$ el valor de L debe estar entre 15 m y 40 m , probando con $L = 20 \text{ m}$ y manteniendo los demás parámetros el espesor equivalente de Hooghoudt: $d = 1.25 \text{ m}$, así:

$$L^2 = 20^2 = 400 \text{ m}^2$$

$$\frac{4K_1h^2}{R} + \frac{8K_2hd}{R} = \frac{4 \times 0.25 \times 0.40^2}{0.015} + \frac{8 \times 1.50 \times 0.40 \times 1.25}{0.015} = 410 \text{ m}^2$$

Como $410 \text{ m} \approx 400 \text{ m}$ se puede aceptar la solución $L = 20 \text{ m}$.

El procedimiento se completa estimando el caudal eliminado, tanto por encima como por debajo de los drenes.

$$R = \frac{4K_1h^2}{L^2} + \frac{8K_2hd}{L^2}$$

Por encima de los drenes:

$$R_1 = \frac{4K_1h^2}{L^2} = \frac{4 \times 0.25 \times 0.40^2}{20^2} = 0.4 \text{ mm/d}$$

Por debajo de los drenes:

$$R_2 = \frac{8K_2hd}{L^2} = \frac{8 \times 1.50 \times 0.40 \times 1.25}{20^2} = 15 \text{ mm/d}$$

La razón de no coincidir $R_1 + R_2 = 15.4 \text{ mm/d}$ con $R = 15 \text{ mm/d}$, es que el espaciamiento necesario no es 20 m , sino algo mayor. Sin embargo, para los objetivos del ejemplo, esa diferencia es despreciable. Se puede comprobar que el caudal a eliminar por debajo del dren es mucho mayor, representando prácticamente la totalidad.

La fórmula general de Ernst que se presenta a continuación, se puede utilizar en los siguientes casos:

$$h = R \frac{D_v}{K_v} + R \frac{L^2}{8\Sigma(KD)_h} + R \frac{L}{\pi K_r} \times L_n \frac{a \times D_r}{u}$$

a. Suelo homogéneo.

Para este caso hay que sustituir en la expresión general los valores siguientes:

$D_v = h$; $K_v = K_h = K_r = K$; $a = 1$, quedando la fórmula de Ernst como sigue:

$$h = R \frac{D_v}{K_v} + R \frac{L^2}{8\Sigma KD_1} + R \frac{L}{\pi K} \times L_n \frac{D_r}{u}, \text{ donde, además, } D_1 = D_r + \frac{h}{2} \text{ y } D_r \leq \frac{L}{4}.$$

b. Varios estratos y los drenes en el estrato inferior.

$D_v = 2D_1$; $D_r < \frac{L}{4}$; $D_2 < \frac{L}{4}$. Así, la fórmula adoptará la forma siguiente:

$$h = R \left[\frac{2D_1}{K_1} + \frac{h-2D_1}{K_2} \right] + R \frac{L^2}{8(K_1D_1+K_2D_2)} + R \frac{L}{\pi K_2} \times L_n \frac{D_r}{u}; \text{ Cuando } K_2 > K_1, \text{ la resistencia vertical}$$

en el segundo estrato: $(h - 2D_1) / K_2$ se puede despreciar. Si además, algo que sucede con frecuencia, $D_1 < D_2$, el producto $K_1 \times D_1$ es despreciable frente a $K_2 \times D_2$, y la expresión anterior adopta una forma más simple:

$$h = R \frac{2D_1}{K_1} + R \frac{L^2}{8K_2D_2} + R \frac{L}{\pi K_2} \times L_n \frac{D_r}{u}$$

c. Varios estratos y los drenes en el límite de dos estratos.

El factor $a = 1$, pero hay que diferenciar las posibilidades siguientes:

$K_1 \ll K_2$; La fórmula queda como sigue:

$$h = R \left[\frac{2D_1}{K_1} \right] + R \frac{L^2}{8(K_1D_1+K_2D_2)} + R \frac{L}{\pi K_2} \times L_n \frac{D_r}{u}$$

$$K_1 \approx K_2$$

$$h = R \frac{2D_1}{K_1} + R \frac{L^2}{8K_2D_2} + R \frac{L}{\pi K_2} \times L_n \frac{D_r}{u}$$

$K_1 \gg K_2$; En este caso, lo recomendable es utilizar la fórmula de Hooghoudt:

d. Varios estratos y los drenes en el estrato superior. En estos casos se hace $D_r = D_0$ y el factor a debe ser considerado, por lo que se pueden presentar tres posibilidades:

$$K_2 > 20K_1$$

En el nomograma, se observa que para esa condición $a = 4$ y la fórmula queda:

$$h = R \frac{D_v}{K_1} + R \frac{L^2}{8(K_1 D_1 + K_2 D_2)} + R \frac{L}{\pi K_1} \times L_n \frac{4D_0}{u}$$

$$0,1 K_1 < K_2 < 20 K_1$$

$$h = R \frac{D_v}{K_1} + R \frac{L^2}{8(K_1 D_1 + K_2 D_2)} + R \frac{L}{\pi K_1} \times L_n \frac{aD_0}{u}$$

$$0,1 K_1 > K_2$$

En este caso, el estrato L_2 se puede considerar como impermeable con respecto al primero y se aplica la fórmula para suelos homogéneos, considerando $K_1 = K$

El procedimiento se explicará a continuación por medio de un ejemplo.

Calcular el espaciamiento de los drenes en el caso del ejemplo anterior el caudal a eliminar es de 20 mm/d ($R = 0.02$ m/d) y los drenes de radio $r = 0.04$ m, se han instalado en una zanja de 0.20 m de anchura.

Se trata de un caso de suelo estratificado con drenes en el estrato inferior:

$h = h_v + h_h + h_r$; para el cálculo se utiliza el procedimiento de tanteo sucesivo, introduciendo en las fórmulas distintos valores de L , hasta que el h calculado coincida con el dato, se empieza calculando h_v , ya que este componente, al ser independiente del espaciamiento de los drenes, tiene el mismo valor cualquiera que sea el valor tanteado de L .

$$h_v = R \left(\frac{2D_1}{K_1} + \frac{h - 2D_1}{K_2} \right) = 0.02 \left(\frac{0.02}{0.4} + \frac{0.50 - 0.20}{2} \right) = 0.013 \text{ m}$$

Este valor es prácticamente despreciable no obstante para que el ejemplo sea completo se tendrá en cuenta. Luego se calculan h_h y h_r .

Primer tanteo: $L = 50$ m; $h_v = 0.013$ m

$h_h = R \times \frac{L^2}{8(K_1 D_1 + K_2 D_2)} = 0.02 \times \frac{50^2}{8(0.4 \times 0.1 + 2 \times 3)} = 1.03$ m; Como este valor ya es muy superior a $h = 0.50$ m, no es preciso calcular h_r pues se puede deducir que (L) empleado es excesivo.

Obsérvese que $\sum D < \frac{L}{4}$: $D = D_1 + D_2 = 0.1 + 3 = 3.1 < \frac{50}{4} = 12.5$

Segundo tanteo: $L = 25$ m; $h_v = 0.013$ m

$$h_h = R \times \frac{L^2}{8(K_1 D_1 + K_2 D_2)} = 0.02 \times \frac{25^2}{8(0.4 \times 0.1 + 2 \times 3)} = 0.26 \text{ m}$$

$$h_r = R \times \frac{L}{\pi K_2} \times L_n \frac{D_r}{U} = 0.02 \times \frac{25}{2\pi} \times L_n \frac{2.70}{0.36} = 0.16 \text{ m}$$

$$U = b + 4r = 0.20 + 4 \times 0.04 = 0.36$$

$h = h_v + h_h + h_r = 0.013 + 0.26 + 0.16 = 0.433 < 0.50 \text{ m}$; este resultado implica que el espaciamiento $L = 25 \text{ m}$ es demasiado corto.

Tercer tanteo: $L = 30 \text{ m}$; $h_v = 0.013 \text{ m}$

$$h_h = R \times \frac{L^2}{8(K_1 D_1 + K_2 D_2)} = 0.02 \times \frac{30^2}{8(0.4 \times 0.1 + 2 \times 3)} = 0.37 \text{ m}$$

$$h_r = R \times \frac{L}{\pi K_2} \times L_n \frac{D_r}{U} = 0.02 \times \frac{30}{2\pi} \times L_n \frac{2.70}{0.36} = 0.19 \text{ m}$$

$$U = b + 4r = 0.20 + 4 \times 0.04 = 0.36$$

$h = h_v + h_h + h_r = 0.013 + 0.37 + 0.19 = 0.57 > 0.50 \text{ m}$; este resultado implica que el espaciamiento $L = 30 \text{ m}$ es excesivo.

Cuarto tanteo: $L = 27 \text{ m}$; $h_v = 0.013 \text{ m}$

$$h_h = R \times \frac{L^2}{8(K_1 D_1 + K_2 D_2)} = 0.02 \times \frac{27^2}{8(0.4 \times 0.1 + 2 \times 3)} = 0.30 \text{ m}$$

$$h_r = R \times \frac{L}{\pi K_2} \times L_n \frac{D_r}{U} = 0.02 \times \frac{27}{2\pi} \times L_n \frac{2.70}{0.36} = 0.17 \text{ m}$$

$$U = b + 4r = 0.20 + 4 \times 0.04 = 0.36$$

$h = h_v + h_h + h_r = 0.013 + 0.30 + 0.17 = 0.483 \cong 0.50 \text{ m}$; este resultado implica que La altura calculada es sensiblemente igual a la permisible, que es $h = 0.50 \text{ m}$. Por tanto, la solución buscada es $L = 27 \text{ m}$.

PARA COMPLETAR EL EJEMPLO SE CALCULA EL ESPACIAMIENTO POR LA FÓRMULA DE HOOGHOUTD.

$$L^2 = \frac{4K_1 h^2}{R} + \frac{8K_2 h d}{R} \quad \text{Por medio de tanteos se llega al valor } L = 25 \text{ m}; L^2 = 625$$

$$\frac{4K_1 h^2}{R} + \frac{8K_2 h d}{R} = \frac{4 \times 0.4 \times 0.5^2}{0.02} + \frac{8 \times 2 \times 0.50 \times 1.50}{0.02} = 620 \text{ m}^2 \cong 625. \text{ Por tanto por el método Hooghoudt}$$

se llega a una solución prácticamente igual a la correspondiente al método de Ernst. Sin embargo a veces aparecen diferencias. El método de Ernst aunque más laborioso es

preferible al de Hooghoudt por su mayor precisión, pues tiene en cuenta un mayor número de los muchos factores que intervienen.

Caudal de los drenes en régimen permanente.

Una vez determinado el espaciamiento y la profundidad de los drenes, es preciso conocer el caudal que han de transportar, con objetivo de calcular su diámetro, pendiente, etc. Los drenes son unas conducciones (abiertas o cerradas) cuyo caudal aumenta con longitud. La figura representa un terreno en el que se ha instalado un sistema de drenes paralelos que conducen agua a un colector. El espaciamiento entre los drenes es L . Cada dren recoge el agua de una zona que mide $\frac{L}{2}$ a cada lado del dren. Sean, por tanto, a una zona de anchura L (igual al espaciamiento). Si el caudal por unidad de superficie es R , el caudal recogido por unidad de longitud de dren será: $Q = R \times L$, en un punto situado a una distancia "a" del origen, el caudal es: $Q = R \times L \times a$ y en el extremo del dren, si su longitud es (l):

$$Q = R \times L \times l$$

Siendo:

R = lluvia

L = espaciamiento entre drenes

l = longitud del dren

Cálculo del diámetro de los drenes en régimen permanente.

Los drenes son una conducción cuyo caudal aumenta con la longitud. Si se compara un dren con una conducción del mismo material y diámetro, en la que el caudal sea constante e igual al que lleva el dren en el extremo aguas abajo, se observa que en el caso del dren el rozamiento es menor y que la misma pendiente puede conducir un caudal mayor.

a) Drenes lisos (cerámico, hormigón, PVC liso)

$$d = 0.1913 \times Q^{0.368} \times i^{-0.211}$$

$$Q = 89 \times d^{2.714} \times i^{0.572}$$

b) Drenes corrugados

$$d = 0.2557 \times Q^{0.375} \times i^{-0.187}$$

$$Q = 38 \times d^{2.667} \times i^{0.5}$$

Donde.

Q =caudal a eliminar por el dren en m^3/s

d = diámetro interior del dren en m

i = gradiente hidráulico.

II.4.- Introducción al diseño de obras de protección contra inundaciones

Las inundaciones y las tormentas afectan a las vidas humanas desde los albores de la civilización, pero todos los tipos de inundaciones, (crecidas y tormentas ribereñas y costeras, fusiones de nieve repentinas, inundaciones tras intensas precipitaciones) han pasado a ser más destructivas en los últimos decenios, debido a que cada vez se construye más infraestructura humana en zonas expuestas a inundaciones, y es probable que su impacto vaya a ser más pronunciado en el futuro, incluyendo los efectos del cambio climático. Todos están al corriente de ello por las informaciones que llegan por los medios de comunicación y, quizás, por la propia experiencia. Si bien no se puede impedir las inundaciones de gran magnitud, lo que sí se puede es asegurar de que se aprovechen los servicios de protección contra inundaciones que suministran gratuitamente los humedales. Los ríos, lagos y marismas frenan y contienen las aguas de crecida, pero ello sólo es posible si no se construyen los centros urbanos en llanuras de inundación naturales y se medita más sobre las consecuencias de canalizar los ríos y drenar y secar las marismas y otros humedales.

La protección contra las inundaciones incluye, tanto los medios estructurales, como los no estructurales, que dan protección o reducen los riesgos de inundación. El concepto de inundación está vinculado a una escala mayor, regional, de los problemas de drenaje. Son afectaciones que rebasan el marco del área agrícola de una zona urbanizada. Es decir, fenómenos naturales de gran magnitud, desastrosos, que originan pérdidas de vidas humanas y daños a la agricultura, ganadería, industrias, etc.

Esas inundaciones se pueden deber a:

1. Desbordamiento de ríos o arroyos producto de grandes avenidas.
2. Escurrimientos superficiales excesivos, originados por lluvias extraordinarias, en momentos de saturación total u obstrucción de los desagües naturales existentes.
3. La construcción de obras civiles, que cambian las condiciones naturales de escurrimiento existentes, y que se detectan en momentos de lluvias extraordinarias.

Las soluciones de defensa o protección contra las inundaciones están asociadas a:

1. La construcción de embalse reguladores aguas arriba de las zonas afectadas (tema que se estudia en cursos de Hidrología Superficial).
2. La construcción de una o varias cauces artificiales para recolectar y conducir fuera del área a proteger, los volúmenes de agua en exceso. En este caso, se presentan dos variantes de solución:

a) Por la rectificación y ampliación de los causes de los ríos, arroyos y vaguadas que concentran el escurrimiento de la avenida a evacuar.

b) Por la construcción de diques de tierra protectores para contener el avance de la avenida.

En el control y defensa contra las inundaciones se utiliza una clasificación de los ríos en función de la longitud del mismo y del área de la cuenca de aporte, la Tabla 1.15 de Anexos aborda la nomenclatura de los ríos propuesta por (Vigoa 2000). La tabla 1.16 que le sigue muestra diferentes criterios para seleccionar la probabilidad de diseño.

Rectificación de los ríos:

La solución más simple para evitar una inundación es tener suficiente capacidad en un cauce para conducir los volúmenes de agua de la avenida hasta su vertimiento final. Muchas veces esto se resuelve con la rectificación y ampliación del cauce natural existente para ello se pueden seguir de forma general, los siguientes pasos.

a) Calcular el gasto del diseño, según la probabilidad que se indique, por cualquiera de los métodos estudiados en Hidrología Superficial. El método de la fórmula racional puede ser impreciso en estos casos.

b) Revisar las secciones transversales naturales de los causes y su capacidad para evacuar ese gasto. Se presentan tres casos:

1. Tramos con cauce insuficiente en meandros.
2. Tramos con cauce insuficiente sin meandros.
3. Tramos con cauce insuficiente y necesidad de diques protectores.

En todos los casos es fundamental estudiar la capacidad del vertimiento final del cauce para evitar posibles remansos aguas arriba. Se toman en consideraciones los afluentes del río rectificado, si los hubiera.

c) En los dos primeros casos se trata de una obra simple de rectificación de ríos, la cual debe ejecutarse siguiendo la regla siguiente:

1. El cauce modificado debe ser de sección trapecial.
2. Evitar en todo lo posible crear un cauce nuevo que no contenga parte del cauce natural existente.
3. En la zona donde se vaya a dejar meandros fuera del cauce rectificado, se deben hacer obras de reforzamientos y protección del cauce en los puntos de cambio de trayectoria.
4. Si hay que hacer desvíos de cauce, atravesar siempre que se pueda, las zonas cársicas, porque aumentan la capacidad de evacuación de la avenida.
5. El cruce de carreteras se debe efectuar perpendicularmente. El ángulo de cruce permisible es de 60 grados.
6. Las curvas de trazado serán de un radio mayor de 300m y la longitud de la curva siempre será mayor que el radio.
7. En algunos tramos de las rectificaciones, a veces, es conveniente revestir el cauce o construir obras que eviten la erosión excesiva.

Cauce insuficiente con meandros:

Una forma de reducir las inundaciones por desbordamiento de los ríos es aumentando la capacidad hidráulica del cauce principal por medio del corte de meandros. El procedimiento consiste en construir un canal entre los puntos A y B, llamado cauce piloto, que se excavará hasta alcanzar el nivel del fondo del río, según la línea imaginaria que une a los fondos del río en esos puntos. El ancho del cauce piloto (B_{min}), deberá ser igual a dos veces la altura que existe desde el fondo del cauce piloto hasta la superficie del terreno.

$$B_{min} = 2(\text{nivel del terreno} - \text{nivel del fondo})$$

Como el cauce piloto se deberá ampliar poco a poco a causa de la capacidad de arrastre y erosión del agua que pasa por él, la velocidad del agua para el gasto de estiaje se tendrá que diseñar para que sea mayor que tres veces la velocidad media necesaria para arrastrar el material de fondo y de las orillas.

Tramos con cauce insuficiente. Cauces de alivio.

Cuando el volumen de la avenida desborda el cauce principal del río, sobre todo en tramos que pasan por zonas que son de interés proteger, se puede diseñar como solución, el desvío de una parte del gasto por otro cauce construido con ese objetivo. El agua desviada debe ser conducida al mar, o, a otro receptor que impida su retorno. Esta canalización se llama

cauce de alivio, los cuales, por lo general se construyen sobre una planicie, limitados por diques longitudinales, que se construyen con el material excavado de una pequeña canalización central. Mientras más separados estén los diques laterales, su altura tendrá que ser menor.

Mientras los gastos son pequeños y no sobrepasan la capacidad del cauce principal, todo el gasto escurrirá por el río. Cuando llegue el gasto de la avenida de cálculo y suben los niveles, se produce la entrada del agua al cauce de alivio, cuyo nivel es similar al nivel del terreno natural y se cumple que:

$$Q_{aa} = Q_{ab} + Q_d \quad (1)$$

Donde:

Q_{aa} : gasto en el río aguas arribas del desvío.

Q_{ab} : gasto en el río aguas abajo del desvío.

Q_d : gasto desviado por el cauce de alivio.

Para el gasto del agua del río al cauce de alivio se construye un pequeño cimacio de unos 50cm de alto y una longitud L que se calcula por las fórmulas de los vertedores laterales a partir del gasto Q_d en m^3/s :

$$Q_d = m_o * L(\sqrt{2g}) * H_2^3 \quad (2)$$

Donde:

m_o : es el coeficiente de gasto, que para vertedores de perfil práctico con vacío, varía entre 0.42 y 0.45.

L : longitud efectiva del vertedor, en m.

g : aceleración de la gravedad en m/s^2 .

H : carga total sobre el vertedor en m.

Diques de tierra.

Los diques de tierra contra inundaciones se construyen en los casos siguientes:

- a) Para ampliar el cauce de avenida de un río rectificado.
- b) Para contener los desbordamientos de una margen baja de un río sin rectificación (dique longitudinal en una sola margen).
- c) Para evitar que los excesos de escurrimiento superficial pasen a zonas bajas que deben ser protegidos (dique perimetral).

Diques perimetrales.

Los diques perimetrales se construyen para proteger zonas urbanas, industriales o agropecuarias, ubicadas en zonas bajas, con topografía que facilita su inundación, producidas por los desbordamientos periódicos de un río o por avenidas extraordinarias. Tienen la ventaja de ser la solución más económica que se puede construir y no alteran los niveles de la corriente, ya que su efecto en ella es reducida o nulo, la altura del dique se fija partiendo de los niveles máximos que se han registrado con anterioridad, obtenidos por investigaciones acerca de las huellas dejadas por el agua y sumándole un borde libre que puede variar entre 1 a 1.5m.

Diques longitudinales.

Los diques longitudinales se construyen a lo largo de los márgenes de los ríos, sobre lo que constituye la llanura de inundación de éste y se utilizan como solución para proteger de las inundaciones grandes extensiones de terreno. Son obras más costosas y que requieren de una mayor calidad en su construcción por el peligro que puede representar en las zonas más cercanas a una posible rotura. Se pueden construir en una o ambas márgenes del río y su objetivo es confinar el agua dentro del cauce principal.

Si los diques longitudinales incluyen una berma, a la hora de realizar el diseño hidráulico hay que tomar en consideración que el gasto se producirá en dos secciones: una correspondiente al cauce principal y la otra a la zona de las bermas (cauce de la avenida), pudiendo el coeficiente de rugosidad diferir considerablemente.

Diseño geométrico de los diques:

Los diques de tierra contra las inundaciones funcionan como pequeñas cortinas de una presa, pero teniendo en cuenta que no siempre tienen agua por la intermitencia de las avenidas. Siguen las mismas normas geométricas de trazado en planta que las rectificaciones:

$h = (0.60 - 1.0) m.$ en zonas rurales.

$h = (1.0 - 1.50) m,$ en zonas urbanizadas e industriales.

H: altura del dique, se determina en función del gasto de diseño.

L H máxima de los diques de protección debe estar entre (10-12) m por razones de resistencia del terreno natural, aunque lo recomendable es que no pasen de 5 o 6 m.

c: corona del dique, su ancho depende de si se usa o no el dique como camino, mínimo igual a 3m.

Las pendientes de los taludes del dique son muy importantes y dependen del tipo de material con que se construya el dique: el talud mojado (m) siempre debe ser más extendido que el seco (m') para una mayor estabilidad, ya que está sometido a los cambios bruscos de humedad en el material producto de las fluctuaciones. La tabla 1.17 de Anexos debida a (Vigoa 2000) orienta sobre los valores de la pendiente del talud en función del tipo de material del Dique.

Como criterio inicial para realizar el dimensionamiento de un cauce con diques longitudinales o ambos lados, se puede utilizar la expresión siguiente:

$$D \approx \frac{Q}{h_1 \times h_2} \quad (3)$$

Donde:

D : Ancho total entre diques.

Q : Gasto de diseño.

h_1 : Profundidad de la crecida en condiciones naturales (antes de construir los diques).

h_2 : Profundidad de la avenida después que se construyan los diques.

Para el diseño hidráulico, tanto de los cauces rectificadas, como para los cauces artificiales con diques, se puede utilizar la fórmula de Manning, tomando en consideración que la velocidad máxima no sea mayor que la permisible, para evitar la erosión y llegando a la solución final por aproximaciones sucesivas.

La profundidad de la crecida en condiciones naturales se determina de forma aproximada por investigaciones sobre la huella dejada por el agua y entrevistas a testigos de las inundaciones anteriores. El conocer la profundidad de la avenida antes de la construcción de los diques permite, fijar D según conveniencia y despejar h_2 y así comenzar el tanteo.

$$H = h_2 - \text{prof. del cauce rectificado} + \text{reserva } (h) \quad (4)$$

Se debe tener presente que la profundidad del cauce rectificado no coincide con la profundidad de la crecida en su cauce natural (h_1) antes de las labores de rectificación.

Cálculo de las obras de rectificación:

Cuando se explicó el dimensionamiento del cauce piloto para construir la rectificación de un río (eliminación de meandros), se mencionó la velocidad necesaria para arrastrar el material del fondo y de las arcillas, para lo cual se puede emplear la expresión siguiente:

$$V_p = a * V_o * y^\alpha \quad (5)$$

Donde:

V_p : Velocidad mínima que garantiza el movimiento de las partículas, en m/s.

a : Parámetro que depende de la ubicación del cauce (α en las zonas llanas y $a = 1.1$ en zonas con pendientes)

V_o : Velocidad media máxima que soportan las partículas del fondo sin que se produzca erosión y depende del tirante de circulación y del diámetro medio en la sección, en m/s.

y : Tirante medio en la sección, calculado como el área entre el ancho de la superficie libre, en m.

α : Exponente que depende del tirante medio y que toma los valores siguientes:

$$\alpha = \frac{1}{3}, \text{ si } y < 1.50\text{m.}$$

$$\alpha = \frac{1}{4}, \text{ si } 1.50 \leq y \leq 2.50\text{m.}$$

$$\alpha = \frac{1}{5}, \text{ si } y > 2.50\text{m.}$$

La Tabla 1.18 describe los valores de la velocidad permisible en función del diámetro medio de las partículas para tirante ($y = 1 \text{ m}$).

Fórmula de Manning para el cálculo hidráulico:

$$V = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times S^{1/2} \quad (6)$$

Donde:

V : Velocidad media del cauce, en m/s.

n : Coeficiente de rugosidad, adimensional.

R : Radio hidráulico, en m.

S : Pendiente del cauce, en tanto por uno.

Para un canal de sección transversal trapecial:

$$A = by + my^2 \quad (7)$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + m^2} \quad (8)$$

Donde:

A: Área de la sección transversal.

P: Perímetro mojado.

b: Ancho del plato del canal.

y: Profundidad normal de circulación de agua.

m: Pendiente del talud de los lados del canal.

III.- Consideraciones sobre los contenidos de la asignatura Ingeniería de Drenaje.

III.1 Programa analítico.

PROGRAMA ANALÍTICO

CARRERA: INGENIERÍA HIDRÁULICA

CURSO DIURNO (4 años)

ASIGNATURA: Ingeniería de Drenaje Agrícola

CURSO: 2020 – 2021

OBJETIVOS EDUCATIVOS E INSTRUCTIVOS:

Formar un Ingeniero Hidráulico que al terminar sus estudios de pregrado y etapa de adiestramiento 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 hidrológico e hidráulico, los sistemas de drenaje y saneamiento agrícola que mayormente se utilizan en el sistema de la Agricultura en Cuba, teniendo en cuenta las técnicas básicas y auxiliares para el lavado y la recuperación de suelos salinos, los procedimientos para el diseño de sistemas de drenaje superficial y subterráneo y los parámetros necesarios para el diseño de obras de protección y control de inundaciones en explotaciones agrícolas.

a) Conocimientos básicos a adquirir

1. Afectaciones a los cultivos por el drenaje.
2. Nivelación de tierras. Métodos de cálculo de la nueva superficie del terreno. Cubicación. Diferentes actividades requeridas para la nivelación (NO PRESENCIAL).
3. Técnicas de recuperación de suelos.
4. Drenaje superficial. Elementos que conforman el sistema. Métodos de cálculo del escurrimiento superficial. Recomendaciones para el proyecto de los canales.
5. Drenaje Subsuperficial. Fundamento teórico. Ecuaciones para el cálculo del régimen permanente. Recomendaciones prácticas para el diseño.
6. Protección contra inundaciones (SEMIPRESENCIAL).

b) Habilidades básicas a dominar:

1. Calcular la dosis de lavado a aplicar con el riego para mantener la salinidad de suelo en valores permisibles para los cultivos.
2. Calcular la dosis de lavado necesaria para planificar la recuperación de suelos salinos y hacer el suelo más idóneo para diferentes cultivos.
3. Determinar la escorrentía superficial, como componente fundamental del caudal a evacuar por el sistema de drenaje.

4. Diseñar los parámetros hidrológicos de un sistema de drenaje superficial y concebir el esquema de drenaje.
5. Diseñar los parámetros fundamentales de un sistema de drenaje subterráneo y concebir el esquema de drenaje.
6. Calcular los parámetros hidráulicos de las obras de protección contra inundaciones.

c) Valores de la Carrera a que tributa:

Estos valores se encuentran explicados e el modelo del profesional.

1. Responsabilidad.
2. Laboriosidad.
3. Objetividad.
4. Audacia Creativa.
5. Solidaridad.
6. Compañerismo.
7. Honradez.

PLAN TEMÁTICO (CURSO 2020 - 2021)

#	TEMAS	HORAS			
		TOTAL	C	CP	T
I	Generalidades de los sistemas de Drenaje y Saneamiento Agrícola. Programación de lavados de suelos salinos.	16	8	6	2
II	Diseño de sistemas de Drenaje Agrícola. Obras de protección contra inundaciones.	24	8	10	6
Σ	TOTALES	40	16	16	8

ESTRUCTURA DE CADA TEMA (CURSO 2020 - 2021)

#	Objetivos Instructivos	Sistemas de Conocimientos	Sistemas de Habilidades
I	<p>Conocer las técnicas básicas y auxiliares para la recuperación de suelos salinos y aplicar las relaciones suelo – agua a la solución de problemas de exceso de humedad.</p> <p>Programar lavados de recuperación y/o mantenimiento ante la presencia de sales perjudiciales para el desarrollo de los cultivos, en el interior de los suelos agrícolas.</p>	<p>Introducción al drenaje agrícola, definición, objetivos, y justificación económica. Influencia del mal drenaje en las propiedades del suelo y los cultivos. Drenaje Parcelario. Importancia y requerimientos.</p> <p>Relaciones suelo-agua. Ley de Darcy. Capilaridad. El fenómeno del Seepage. Proceso de salinización de los suelos, sales más importantes. Conductividad eléctrica. Efectos de la salinidad sobre las plantas y el suelo. Clasificación de los suelos salinos. Técnicas de recuperación de suelos salinos. Prácticas agrícolas contra la salinidad.</p>	<p>Identificar y describir las propiedades físicas del suelo y su relación con las condiciones de mal drenaje.</p> <p>Identificar. Aplicación de la relación suelo-agua a los cálculos del drenaje: (<i>Macroporosidad</i>, permeabilidad y capilaridad).</p> <p>Identificar los tipos de nivelación.</p> <p>Nivelación para riego y para drenaje: Factores a considerar. Criterios de diseño. Procedimiento del diseño.</p> <p>Métodos de cálculo: Mínimos cuadrados y perfiles medios. Dobles perfiles. Perfiles simples. Método de los puntos. Ajuste de curvas. Aplicar un software para el cálculo de la nivelación. Calcular las necesidades de lavado. Lavados de recuperación y de mantenimiento.</p>
II	<p>Aplicar los procedimientos establecidos en la práctica cubana para el diseño de sistemas de drenaje superficial, sistemas de drenaje subterráneo, así como para calcular los parámetros necesarios para el diseño de las obras de protección contra inundaciones.</p>	<p>Drenaje superficial. Caudal a eliminar: Caudal base y Escorrentía superficial. Aspectos económicos y ambientales del drenaje. Drenaje subterráneo. Criterios agronómicos de drenaje. Fórmulas aplicables al régimen permanente y al régimen variable. Obras de protección contra inundaciones. Dimensionamiento de los parámetros hidráulicos. Canales de cinturón.</p>	<p>Clasificación de los sistemas de drenaje. Principales características, ventajas e inconvenientes. Partes componentes.</p> <p>Diseñar un sistema de drenaje superficial: Caudal base época de riego; Caudal base época de lluvias. Escorrentía superficial. Sección de los canales. Espaciamiento entre canales.</p> <p>Diseñar un sistema de drenaje subterráneo: Aplicar los criterios agronómicos de drenaje y la profundidad óptima de la capa freática para diferentes cultivos Caudal a eliminar por el dren. Espaciamiento entre drenes. Profundidad de los drenes. Pendiente y diámetro de los drenes.</p>

INDICACIONES METODOLÓGICAS Y DE ORGANIZACIÓN DE LA ASIGNATURA

Las horas totales deben distribuirse en Conferencias, Clases Prácticas y Talleres. Las habilidades planteadas solo pueden lograrse con un alto grado de ejercitación por parte del estudiante, incluyendo la orientación de trabajos extraclase. Las clases prácticas se enfocan fundamentalmente hacia la solución de problemas vinculados al lavado y recuperación de suelos salinos y al diseño de sistemas de drenaje agrícola superficial y subsuperficial. Los contenidos impartidos se evaluarán sistemáticamente en las clases prácticas, los trabajos extraclase y la prueba parcial. Se planifica un trabajo extraclase en el semestre, evaluando su realización de manera independiente, propiciando que las mismas impliquen la toma de decisiones y el uso de la computación y el idioma inglés, así como desarrollar la capacidad para presentar información que cumpla con las reglas de redacción, ortografía y presentación de documentos profesionales. Se garantiza el vínculo con la Disciplina Integradora a través de la asignatura optativa de la Profesión.

BIBLIOGRAFÍAS

(Texto Básico)

Autor	Título	Editorial	País	Año
Dr. Rafael Vigoa Hernández	Drenaje Agrícola	Félix Varela	Cuba	2001

(Textos Complementarios)

Autor	Título	Editorial	País	Año
Fernando Pizarro	Drenaje Agrícola y Recuperación De Suelos Salinos	Mundiprensa	España	1985
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 (40 horas), el (70 %) se dedica a las actividades prácticas (30 horas). El fondo dedicado a las conferencias (12 horas = 30%), utiliza literatura actualizada sobre el tema del diseño de sistemas de drenaje superficial y subterráneo con

Consideraciones sobre los contenidos de la asignatura de Ingeniería de Drenaje Agrícola

un enfoque práctico que contribuye a los modos de actuación del Ingeniero Hidráulico, igualmente destacan los temas sobre técnicas de lavado y recuperación de suelo y las obras de protección contra inundaciones. Las actividades prácticas están enfocadas a desarrollar habilidades en los contenidos tratados, con el propósito de lograr un profesional más competitivo en la rama de la gestión eficiente del agua con fines agrícolas, la protección del medioambiente y la producción de alimentos en Cuba.

SISTEMA DE EVALUACIÓN

1. Actividades periódicas

- Se evalúa la participación de los estudiantes en las actividades prácticas y en conferencias, mediante preguntas de comprobación de la actividad anterior y se imponen ejercicios propuestos como auto preparación para los Talleres.

2. Actividades parciales (planificadas en P4)

- Trabajo extraclase No.1 correspondiente al tema: Nivelación y sistematización de tierras para regadíos. Se aplican los Programas Directores de ICT y las TIC, se orientan la búsqueda y revisión bibliográfica en INTERNET.
- Trabajo extraclase No.2 correspondiente al tema: Obras de Protección contra Inundaciones. Se aplican los Programas Directores de ICT y las TIC, se orientan la búsqueda y revisión bibliográfica en INTERNET sobre el tema relacionado con la Simulación de Inundaciones y soluciones asociadas.
- Un Examen Final donde se evalúan las habilidades para el diseño de sistemas de drenaje subterráneo como complemento de la programación de lavados de recuperación y mantenimiento de suelos salinos.

SOFTWARE PROFESIONALES

Se gestionan.

PROGRAMAS DIRECTORES

1. Computación

- Se aplica a través de los Trabajos Extraclase orientados, donde los estudiantes deben utilizar el paquete Office, el Aula Virtual, INTERNET y otras fuentes de información. Forma parte del sistema de evaluación parcial.

Tema	Actividad	Programa	Tiempo	T. Independiente	Evaluación
I	Trabajo Extraclase No.1, se impone en Conferencia 1	Microsoft Office, Internet.	6 horas	Búsqueda y revisión bibliográfica	Se entrega impreso siguiendo las normas de edición.
II	Trabajo Extraclase No.2, se impone en Conferencia 1	Microsoft Office, Internet.	6 horas	Búsqueda y revisión bibliográfica	Se entrega impreso siguiendo las normas de edición.

2. Información Científico-Técnica

- Se fomenta el interés por la búsqueda bibliográfica referida a los trabajos de Nivelación y sistematización de tierras para regadíos, así como, a las *Obras de protección contra Inundaciones*, donde deberán realizar una minuciosa revisión bibliográfica.

PLAN CALENDARIO (CURSO 2020 – 2021)

Actividad		(h)	Contenido	MTE	Observaciones
#	Tipo				
1	C1	2	Introducción al Drenaje Agrícola. Antecedentes y evolución. Definición. Objetivos. Justificación económica. Influencia del mal drenaje en el suelo y en los cultivos. Prácticas agrícolas en suelo mal drenados.	PTB	Se orienta TE 1. Se presenta Sistema de Evaluación.
2	C2	2	Movimiento del agua en el suelo. Potencial hídrico. Estados de humedad. Conductividad hidráulica. Capilaridad.	PTB	
3	CP1	2	Aplicaciones de las relaciones suelo – agua a los cálculos del drenaje agrícola. Cálculo del valor de la Capilaridad.	PTB	
4	C3	2	Proceso de salinización de los suelos. Sales más importantes. Conductividad eléctrica. Clasificación de los suelos salinos. Efectos de la salinidad sobre las plantas y el suelo.	PTB	
5	C4	2	Técnicas de recuperación de suelos salinos. Programación de Lavados de mantenimiento y de recuperación.	PTB	

6	CP2	2	Cálculo de las necesidades de lavado. Ecuaciones de equilibrio de sales.	PTB	
7	CP3	2	Lavados de recuperación. Ecuaciones de almacenamiento de sales.	PTB	
8	T1	2	Ecuaciones de equilibrio de sales. Ecuaciones de almacenamiento de sales	PTB	
9	C5	2	Sistemas de Drenaje Superficial. Información básica para el diseño. Caudal a evacuar. Tiempo de concentración. Escorrentía superficial. Esquemas de drenaje.	PTB	Se orienta TE # 2.
10	CP4	2	Diseño de sistemas de drenaje superficial. Esquemas de drenaje.	PTB	
11	T2	2	Diseño de sistemas de drenaje superficial.	PTB	
12	C6	2	Sistemas de Drenaje Agrícola. Clasificación. Ventajas e inconvenientes. Componentes. Criterios de selección. Criterios agronómicos. Profundidad óptima de la capa freática.	PTB	
13	C7	2	Sistemas de drenaje subterráneo en régimen permanente. Fundamento teórico del cálculo. Hipótesis aceptadas. Fórmulas a considerar en el diseño. Conclusiones.	PTB	
14	CP5	2	Diseño de sistemas de drenaje subterráneo. Ecuación de Hooghoudt. Cálculo de los parámetros hidráulicos.	PTB	
15	T3	2	Diseño de sistemas de drenaje subterráneo en régimen permanente.	PTB	
16	C8	2	Sistemas de drenaje subterráneo en régimen variable. Fórmulas a considerar en el diseño.	PTB	
17	CP6	2	Diseño de sistemas de drenaje subterráneo. Recarga instantánea del acuífero. Parámetros hidráulicos.	PTB	
18	CP7	2	Diseño de sistemas de drenaje subterráneo. Carga continua con percolación constante. Parámetros hidráulicos.	PTB	
19	CP8	2	Diseño de sistemas de drenaje subterráneo. Carga intermitente del acuífero. Parámetros hidráulicos.	PTB	
20	T4	2	Diseño de sistemas de drenaje subterráneo en régimen variable.	PTB	

Aplicaciones de las relaciones suelo – agua a los cálculos del Drenaje Agrícola

1. Partiendo de los siguientes datos ($\varepsilon = 48\%$) y ($CC = 39\%$) y considerando que llueven 30 mm, de los cuales el 25% se pierde por escorrentía superficial. Si el suelo está inicialmente a Capacidad de Campo, ¿cuál será la elevación de la Capa Freática?

SOLUCIÓN:

Como el 25% de los 30 mm que llueven se pierden, solo se $R = 0.75 \times 30mm = 22.5mm$, debido a que el suelo está a Capacidad de Campo y por tanto no está en condiciones de retener humedad.

Siendo la Macroporosidad, la porosidad del suelo cuando el mismo se encuentra a Capacidad de Campo, se puede plantear que:

$\mu = \varepsilon - CC = 0.48 - 0.39 = 0.09$ y por lo tanto la Capa Freática se elevaría una altura equivalente a $h = \frac{R}{\mu} = \frac{22.5}{0.09} = 250mm$.

Conociendo la posición del Nivel Freático se puede estimar con mayor precisión hasta donde ascendería el mismo en ausencia de drenajes. Esta aplicación y otras se pondrán de manifiesto en el tema dedicado al diseño de sistemas de drenaje subterráneo.

2. En un pozo de observación se lee la profundidad de la capa freática que es de 2,5 m, si se produce una lluvia que infiltra en el suelo 63 mm ¿cuál sería la nueva profundidad freática? Si se conoce que el suelo está a Capacidad de Campo. Asuma que: $\alpha = 1.5 \text{ g/cm}^3$; $\delta = 2.52 \text{ g/cm}^3$; $PM = 18\%$; $AU = 16\%$

Al igual que en el ejercicio anterior, la elevación freática se estima a partir de la cantidad de agua infiltrada en el perfil del suelo y de la Macroporosidad. Siendo esta última la porosidad del perfil del suelo cuando este está a Capacidad de Campo, la solución pudiera comenzar con:

$\varepsilon = 100 * \left(\frac{\alpha}{\delta}\right) = 100 * \left(\frac{1.5}{2.52}\right) = 40\%$ y con el resto de los datos se puede estimar: $CC =$

$PM + AU = 18 + 16 = 34\%$, la macroporosidad se puede obtener a través de: $\mu = \varepsilon -$

$CC = 0.40 - 0.34 = 0.06$ y la altura a que se elevaría la Capa Freática se obtiene por: $h =$

$\frac{R}{\mu} = \frac{63}{0.06} = 1.05m$. Como respuesta la nueva profundidad freática se deduce de: $P2 = P1 -$

$h = 2.50 - 1.05 = 1.45m$.

Cálculo del valor de la Capilaridad.

1. Determine el aporte capilar que se produce en una parcela de riego con las siguientes características:

DATOS.

Textura media (FRANCO)

CC = 32%

PM = 20%

Profundidad de la zona radicular = 60 cm.

Profundidad media de la capa freática entre dos riegos consecutivos = 110 cm.

Profundidad media de la capa freática en la temporada de no riegos = 135 cm.

Se riega cuando el agua útil desciende hasta $\frac{2}{3}$ del máximo.

Temporada de riego 8 meses.

A partir de la tabla de máxima velocidad capilar en función de la textura y la profundidad freática, se construye el cuadro que le sigue:

Tabla 3. Máxima velocidad capilar (mm/día). (Vigoa 2000)

PROFUNDIDAD FREÁTICA(cm)	FRANCO ARCILLOSO Y ARCILLA	FRANCO ARENOSO	FRANCO MEDIA	ARENA
25	10.00	Alta	Muy alta	10.00
40	4.00	10.0	Muy alta	2.50
50	2.50	3.0	Alta	1.00
75	1.00	1.00	Alta	0.50
100	0.50	.....	10.0	0.20
150	0.20	.....	1.0 a 4.0	.....
200	.....	.....	0.50 a 1.0	.....

Como el momento del riego el agua útil (AU) a descendido hasta $\frac{2}{3}$ del máximo y $AU = CC - PM = 32 - 20 = 12\%$, entonces la humedad en el momento del riego será: $PM +$

$$\left(\frac{2}{3}AU\right) = 20 - \left(\frac{2}{3} * 12\right) = 28$$

Cuando el suelo está a Capacidad de Campo la velocidad capilar es nula y cuando el suelo está seco, la velocidad capilar alcanza su valor máximo y numéricamente se puede estimar a través de la tabla anterior.

Si la distancia entre la zona radicular y la capa freática es: $110-60=50\text{cm}$, entrando en la tabla en la línea correspondiente a 50 cm y en la columna de suelo FRANCO se obtiene el valor de la velocidad capilar máxima (3 mm/día).

Para calcular la velocidad correspondiente al momento del riego, se establece la hipótesis de que la velocidad capilar es directamente proporcional a la humedad del suelo, esta suposición permite interpolar el valor de la velocidad capilar entre los correspondientes a la humedad a Capacidad de Campo y al Suelo Seco, así: $VC = 3 - \frac{3}{32} * 28 = 0.38\text{mm/días}$.

Tabla 3.1 Interpolación del valor de la velocidad capilar.(Conferencias).

Estado de humedad	Humedad(%de volumen)	Velocidad capilar(mm/día)
CC	32	0
Momentos del riego	28	0.38
PM	20	---
Seco	0	3

Esto significa que entre dos riegos sucesivos la velocidad capilar va aumentando desde el valor 0 que corresponde al momento de terminar el riego, hasta el valor 0.38 mm/día que se alcanza antes de dar el siguiente riego. Su valor medio se puede estimar como: $\frac{0+0.38}{2} = 0.19\text{mm/ días}$. Este valor representa la velocidad capilar media durante la temporada de riego como la misma tiene una duración de 8 meses ($8 \times 30 = 240 \text{ días}$). Por lo tanto el aporte capilar (G1) en la temporada de riegos: $G1 = 240 * 0.19 = 45.6\text{mm}$.

La hipótesis de la variación lineal de la velocidad capilar en función de la humedad presente en el suelo, establecida inicialmente es una simplificación del problema, ya que realmente, el flujo a través de un suelo no saturado (como es el caso del movimiento capilar), la velocidad se relaciona con la velocidad en función de la conductividad hidráulica en el estado de humedad del suelo saturado y la conductividad hidráulica en el estado de humedad del suelo considerado, así como de la porosidad total del suelo y del porcentaje de humedad del suelo en volumen, pero ante la dificultad de estimar con el rigor adecuado la distribución de la humedad en el perfil del suelo y en cada caso concreto (difusividad hidráulica) se ha preferido seguir el procedimiento anteriormente descrito. Para el cálculo del aporte capilar en la temporada de NO riegos, se determina la diferencia entre la profundidad media de la capa freática y la profundidad de la zona radicular del cultivo y con

esa distancia se entra en la tabla antes referida y se selecciona la máxima velocidad capilar que corresponda. Se puede considerar a los efectos del riego y drenaje agrícola que la velocidad capilar media es $\frac{1}{3}$ de la máxima, $135-60=75\text{cm.}$, para esta distancia y textura FRANCA la máxima velocidad capilares de 1 mm/día y como

$(\frac{2}{3}) * 1\text{mm/ día} = \frac{1}{3}\text{mm/ día}$ y el número de días sin riego es de 4 meses (120 días): $G_2 = 120 * (\frac{1}{3}) = 40\text{mm}$. Como conclusión el aporte capilar se obtiene por: $G = G_1 + G_2 = 45.6 + 40 = 85.6\text{mm}$.

Necesidades de lavado. Ecuación de Equilibrio de Sales.

1. Determine el volumen de agua a evacuar por el sistema de drenaje en una parcela de riego donde se cultiva: sorgo, algodón y cebada. La capa freática está muy profunda por tanto no se consideran aportes capilares ($G = 0$). Asuma los siguientes datos: Evaporación anual (E) = 1 800 mm, Precipitación anual (P) = 900 mm, Conductividad eléctrica del agua de riego (C_i) = 0.6 Ds/m, Porosidad (ϵ) = 38%, Capacidad de Campo (CC) = 16%, Eficiencia de lavado (f) = 1. Se acepta como tolerable una salinidad que ocasione una reducción del 10% en las producciones de los distintos cultivos y se aplican 12 riegos al año.

SOLUCIÓN

Para obtener el agua de lavado (R) se puede emplear la fórmula:

- a) $I * C_i = R * C_{cc}$, en la misma el valor de C_i es un dato del problema y asumiendo (R) en función de (I), el valor de la conductividad eléctrica de la solución del suelo cuando este se encuentra a capacidad de campo (C_{CC}), se puede obtener despejando de:

$C_e * \epsilon = C_R * C_{cc}$, y donde el valor de C_e para el cultivo más exigente de los tres se toma de la tabla al efecto C_e ($CE/90$) = 5.4 Ds/m (para el Sorgo). De esta forma quedaría: $C_{cc} =$

$\frac{C_e * \epsilon}{CC} = \frac{5.4 * 3.8}{0.16} = 12.8 \text{ Ds/m}$ y sustituyendo este resultado en (a), el valor de (R) en función de (I)

se obtiene como: $I * C_i = R * C_{cc}$, $R = I * \frac{C_i}{C_{cc}} = I * \frac{0.6}{12.8} = 0.05 * I$, es decir, el agua de lavado (R) debe ser el 5% del agua aplicada con el riego (I). Sustituyendo en (b), el valor se puede obtener por:

- b) $I - R = E - P$, $I - (0.05I) = 1800 - 900$, $0.95I = 900$, $I = \frac{900}{0.95} = 947\text{mm}$ y por lo tanto el agua de lavado (R) se deduce de: $R = 0.05I = 0.05 * 947 = 47\text{mm}$.

Si la cantidad anual de agua que se aplica con el riego es $I = 947$ mm, 47 mm de estos se utilizan para lavar el suelo (R) y los 900 mm restantes se utilizan para satisfacer las

necesidades hídricas de los cultivos. Como se aplican 12 riegos al año, se puede estimar que la cantidad de agua que se aplica con un riego es de: $\frac{947}{12} = 79mm$, de los cuales (como se vio anteriormente) el 5% corresponden al agua de lavado (R) durante cada aplicación del riego:

$R = 0.05 * 79 = 4mm$. Siendo este (40m³/ha), el volumen de agua que debe evacuar el sistema de drenaje en cada aplicación del riego.

Lavados de Recuperación (Balance de sales). Ecuación de Almacenamiento de Sales.

1. En un terreno de regadío, después de indeterminado riego, el análisis muestra que la salinidad del extracto de saturación del suelo ($C_e = 6$ dS/m). Se quiere conocer la salinidad del suelo después del riego y se conocen los siguientes datos:

DATOS

Porosidad (θ) = 0.42

Capacidad de campo (CC) = 0.30

Punto de marchitamiento (PM) = 0.18

Textura del suelo arcillosa ($f = 0.5$)

Profundidad radicular (P_r) = 90 cm

Se riega cuando la humedad desciende a $\frac{1}{3}$ del agua útil.

La capa freática está muy profunda ($G = 0$)

La frecuencia de riego es de ($IR = 15$ días)

La evaporación diaria es de ($E = 4.80$ mm/d)

La precipitación en los 15 días entre riegos es ($P = 0$)

La salinidad del agua de riego ($C_i = 0.6$ Ds/m)

Por medio de la ecuación de equilibrio de sales se al calculado que ($R = 25\%$ de I)

SOLUCIÓN

Si $I = E - P + R$ como $\rightarrow \rightarrow P = 0, E = 15días * \frac{4.48mm}{día} = 72mm$ Entonces como $R = 0.25 * I$, la cantidad de agua total aplicada con el riego se deduce del consumo de los cultivos (Evapotranspiración) que como no hay precipitaciones es de 72mm, de esta forma $0.75 * I$

$I = 72mm$, $I = \frac{72}{0.75} \approx 96mm$, despejando de la ecuación inicial se puede obtener el agua de lavado (R): $R = I - E = 96 - 72 = 24mm$

Completando el cálculo de los parámetros de la ecuación que se utiliza para calcular el almacenamiento de sales (LAVADOS DE RECUPERACIÓN) se tiene: $A = Ci * (I - R + R * f) = 0.6 * (96 - 24 + 24 * 0.5) = 50.4$, $B = \frac{R*f}{Hc}$; como Hc es el contenido de agua en el suelo a capacidad de campo, se puede deducir de: $Hc = 900mm * 0.3 = 270mm$ y por lo tanto: $B = \frac{R*f}{Hc} = \frac{24*0.5}{270} = 0.04$, continuando se tiene que:

$$Z1 = Hc * Ccc1, Ccc1 = \frac{Ce1 * \epsilon}{CC} = \frac{6 * 0.42}{0.3} 8.4 \frac{Ds}{m}, Z1 = 270 * 8.4 = 2268CEmm$$

$$\Delta Z = \frac{A - B * Z1}{1 + 0.5 * B} = \frac{50.4 - 0.04 * 2268}{1 + 0.5 * 0.04} = 39.5CEmm$$

$$Z2 = \Delta Z - Z1 = 2268 - 39.5 = 2228.5CEmm$$

La salinidad del suelo cuando esta a capacidad de campo (DESPUÉS DE UN RIEGO) es:

$$Ccc2 = \frac{Z2}{Hc} = \frac{2228.5}{270} = 8.25 \frac{Ds}{m}$$
, y en el extracto de saturación del suelo sería:

$Ce2 = Ccc2 * \frac{CC}{\epsilon} = 8.25 * \frac{0.30}{0.42} = \frac{5.9Ds}{m} < \frac{6.0Ds}{m}$, Esto demuestra que la salinidad del suelo disminuye con el riego. Los estudiantes podrán determinar en función de la resistencia de un cultivo dado determinar cuánto debería ser la dosis de riego y de lavado para que la salinidad del suelo disminuya al valor requerido por el cultivo.

2. Con los mismos datos del ejercicio anterior asuma ahora que a 50 cm por debajo de la zona radicular hay una capa freática con una salinidad de ($CG = 12 Ds/m$).

En el momento del riego la humedad es:

$$PM + (1/3) \text{ de agua útil} = 0,18 + ((0,30 - 0,18)/30) = 22$$

Tabla 3.2 (Velocidad Capilar media entre dos riegos, Conferencias).

Estado de humedad	Humedad (% de volumen)	Velocidad capilar (mm/día)
CC	30	0
Momentos del Riego	22	0,67
PM	18	----
Seco	0	2,5

En el período entre dos riego la velocidad capilar media es: $\frac{0+0.67}{2}0.33\text{mm/día}$ y la capilaridad en ese intervalo de días aportaría: $G = 15 * 0.33 = 5\text{mm}$, y el agua de lavado se obtiene de: $R = I + P + G - E = 96 + 0 + 5 - 72 = 29\text{mm}$. Siguiendo el procedimiento anterior se tiene: $A = Ci * (I - R + R * f) + G * Cg = 0.6 * (96 - 29 + 29 * 0.5) + 5 * 12 = 108.9$:

$$B = \frac{39*0.5}{270} = 0.05 \text{ y } Z1 = 2268\text{CEmm}, \Delta Z = \frac{A-B*Z1}{1+0.5*B} = \frac{108.9-0.05*2268}{1+0.5*0.05} = -4\text{CEmm}$$

$Z2 = Z1 + \Delta Z = 2268 - 4 = 2264\text{CEmm}$. Continuando, la salinidad del suelo cuando esta a capacidad de campo (DESPUÉS DE UN RIEGO) es:

$$Ccc2 = \frac{Z2}{Hc} = \frac{2264}{270} = \frac{8.38Ds}{m}, \text{ y en el extracto de saturación del suelo sería:}$$

$Ce2 = Ccc2 * \frac{CC}{\epsilon} = 8.38 \frac{0.30}{0.42} = 5.99 \frac{Ds}{m} < \frac{6.0Ds}{m}$. Comparando este resultado con el del ejemplo anterior se comprueba que la presencia de una capa freática conlleva a que la salinidad final aumente ($5.99 > 5.90$). Por lo tanto la capilaridad puede incluso limitar el fomento de determinados cultivos al elevar a tenores peligrosos la salinidad del suelo.

3. Con los mismos datos del ejercicio anterior pero asuma ahora que por debajo de la zona radicular hay una capa freática con una salinidad de ($Cg = 18 \text{Ds/m}$).

$$A = Ci * (I - R + R * f) + G * Cg0 = 06 * (96 - 29 + 29 * 0.5) + 5 * 18 = 138.9$$

$$B = \frac{39 * 0.5}{270} = 0.05 \text{ y } Z1 = 2268\text{CEmm}$$

$$\Delta Z = \frac{A - B * Z1}{1 + 0.5 * B} = \frac{138.9 - 0.05 * 2268}{1 + 0.5 * 0.05} = 25\text{CEmm}$$

$$Z2 = Z1 + \Delta Z = 2268 + 25 = 2293\text{CEmm}$$

$$Ccc2 = \frac{Z2}{Hc} = \frac{2293}{270} = 8.49 \text{ dS/m}$$

$$Ce2 = Ccc2 * \frac{CC}{\epsilon} = 8.49 * \frac{0.30}{0.42} = 6.06\text{dS/m} > 6.0\text{dS/m}$$

Como se ve, la salinidad que inicialmente era de $Ce = 6 \text{Ds/m}$, a aumentado a 6.06Ds/m , este es el procedimiento típico de salinización de los suelos regados con drenaje insuficiente: la capa freática salina se aproxima a la superficie y si el lavado no es suficiente (no contrarresta a los aportes de sales del agua de riego y de la capilaridad, provoca un

aumento de la salinidad en el extracto de saturación del suelo limitando el fomento de los cultivos más sensibles.

4. Para representar la aplicación de la fórmula de Hooghoudt se muestra a continuación un ejemplo de cálculo.

Datos:

$$K_1 = 0.25 \text{ m/d}$$

$$K_2 = 1.50 \text{ m/d}$$

$$H = 1.20 \text{ m}$$

$$D = 2.00 \text{ m}$$

$$p \text{ (profundidad óptima de la capa freática)} = 0.80 \text{ m}$$

$$R = 15 \text{ m/d} = 0.015 \text{ m/d}$$

$$r \text{ (radio de los drenes)} 5 \text{ cm.} = 0.05 \text{ m}$$

$$h = H - P = 1.20 - 0.80 = 0.40 \text{ m.}$$

De la tabla ($r = 0.005 \text{ m}$), y en función de $L = 40 \text{ m}$ y $D = 2 \text{ m}$ se obtiene: $d = 1.55 \text{ m}$.

Introduciendo los valores anteriores en la fórmula:

$$L^2 = \frac{4K_1h^2}{R} + \frac{8K_2hd}{R} \quad \text{Se obtiene:}$$

$$L^2 = 40^2 = 1600 \text{ m}^2$$

$$\frac{4K_1h^2}{R} + \frac{8K_2hd}{R} = \frac{4 * 0.25 * 0.40^2}{0.015} + \frac{8 * 1.50 * 0.40 * 1.55}{0.015} = 506 \text{ m}^2$$

Como $506 < 1600$, el valor tanteado, $L = 40 \text{ m}$ es excesivo. Se prueba ahora con $L = 15 \text{ m}$.

$$d = (L = 15 \text{ m}; D = 2 \text{ m}; r = 0.05 \text{ m}) = 1.11 \text{ m}$$

$$L^2 = 15^2 = 225 \text{ m}^2$$

$$\frac{4K_1h^2}{R} + \frac{8K_2hd}{R} = \frac{4 * 0.25 * 0.40^2}{0.015} + \frac{8 * 1.50 * 0.40 * 1.11}{0.015} = 365 \text{ m}^2$$

Como $365 > 225$ el valor de L debe ser mayor que 15 m . Se prueba con $L = 20 \text{ m}$.

$$d = (L = 20 \text{ m}; D = 2 \text{ m}; r = 0.05 \text{ m}) = 1.25 \text{ m}$$

$$L^2 = 20^2 = 400 \text{ m}^2$$

$$\frac{4K_1h^2}{R} + \frac{8K_2hd}{R} = \frac{4 * 0.25 * 0.40^2}{0.015} + \frac{8 * 1.50 * 0.40 * 1.25}{0.015} = 410 \text{ m}^2$$

$$410 \approx 400$$

Por tanto la solución es $L = 20 \text{ m}$.

Para completar el ejemplo se calcula el caudal eliminado, tanto por encima como por debajo del dren.

$$R = \frac{4K_1h^2}{L^2} + \frac{8K_2hd}{L^2}$$

a. por encima. Se aplica la fórmula:

$$R = \frac{4K_1h^2}{L^2} = \frac{4 * 0.25 * 0.40^2}{20^2} = 0.0004 \frac{m}{d} = 0.4mm/d$$

b. por debajo. Se aplica la fórmula:

$$R = \frac{8K_2hd}{L^2} = \frac{8 * 1.5 * 0.40 * 1.25}{20^2} = 0.015 \frac{m}{d} = 15 \frac{mm}{d}$$

La razón de no coincidir $R_1 + R_2 = 15.4 \text{ mm/d}$ con $R = 15 \text{ mm/d}$, es que el espaciamiento necesario no es 20 m, sino algo mayor. Sin embargo, a los efectos de este estudio, esa deficiencia es despreciable.

Como se ve el caudal a eliminar por debajo del dren, es mucho mayor representando prácticamente la totalidad.

5. A continuación se representa un ejemplo de cálculo para mayor entendimiento de la fórmula de Ernst.

Calcular el espaciamiento de los drenes en el caso de la figura el caudal a eliminar es de 20 mm/d ($R = 0.02 \text{ m/d}$) y los drenes de radio $r = 0.04 \text{ m}$, se han instalado en una zanja de 0.20 m de anchura.

Se trata de un caso de suelo estratificado con drenes en el estrato inferior:

$$h = h_v + h_h + h_r$$

Para el cálculo se utiliza el procedimiento de tanteo sucesivo, introduciendo en las fórmulas distintos valores de L, hasta que el h calculado coincida con el dato, se empieza calculando h_v , ya que este componente, al ser independiente del espaciamiento de los drenes, tiene el mismo valor cualquiera que sea el valor tanteado de L.

$$h_v = R \left(\frac{2D_1}{K_1} + \frac{h - 2D_1}{K_2} \right) = 0.02 \left(\frac{0.02}{0.4} + \frac{0.50 - 0.20}{2} \right) = 0.013m$$

Este valor es prácticamente despreciable no obstante para que el ejemplo sea completo lo vamos a tener en cuenta.

A continuación se calculan h_h y h_r .

Primer tanteo: $L = 50 \text{ m}$; $h_v = 0.013 \text{ m}$

$$hh = R \frac{L^2}{8(K1D1 + K2D2)} = 0.02 \frac{50^2}{8(0.4 * 0.1 + 2 * 3)} = 1.03m$$

Como este valor ya es muy superior a $h = 0.50$ m, no es preciso calcular h_r , pues ya se puede deducir que el L empleado es excesivo.

Obsérvese que $\Sigma D < L/4$: $D = D_1 + D_2 = 0.1 + 3 = 3.1 < 50/4 = 12.5$

Segundo tanteo: $L = 25$ m; $h_v = 0.013$ m

$$hh = R \frac{L^2}{8(K1D1 + K2D2)} = 0.02 \frac{25^2}{8(0.4 * 0.1 + 2 * 3)} = 0.26m$$

$$hr = R \frac{L}{\pi K2} \ln \frac{Dr}{u}$$

$$U = b + 4r = 0.20 + 4 * 0.04 = 0.36$$

$$hr = 0.02 \frac{25}{3.14 * 2} \ln \frac{2.70}{0.36} = 0.16m$$

$$h = h_v + hh + hr = 0.013 + 0.26 + 0.16 = 0.433 m < 0.50 m.$$

Por tanto, el espaciamiento $L = 25$ m es demasiado corto.

Tercer tanteo: $L = 30$ m; $h_v = 0.013$ m

$$hh = R \frac{L^2}{8(K1D1 + K2D2)} = 0.02 \frac{30^2}{8(0.4 * 0.1 + 2 * 3)} = 0.37m$$

$$hr = 0.02 \frac{30}{3.14 * 2} \ln \frac{2.70}{0.36} = 0.19m$$

$$h = h_v + hh + hr = 0.013 + 0.37 + 0.19 = 0.57 m < 0.50 m.$$

Cuarto tanteo: $L = 27$ m; $h_v = 0.013$ m

$$hh = R \frac{L^2}{8(K1D1 + K2D2)} = 0.02 \frac{27^2}{8(0.4 * 0.1 + 2 * 3)} = 0.30m$$

$$hr = 0.02 \frac{27}{3.14 * 2} \ln \frac{2.70}{0.36} = 0.17m$$

$$h = h_v + hh + hr = 0.013 + 0.30 + 0.17 = 0.483 m < 0.50 m.$$

La altura calculada es sensiblemente igual a la permisible, que es de $h = 0.50$ m. Por tanto, la solución buscada es $L = 27$ m.

$$L^2 = \frac{4K1h^2}{R} + \frac{8K2hd}{R}$$

Por medio de tanteos se llega al valor $L = 25$ m; $L^2 = 620m^2$

$$\frac{4K1h^2}{R} + \frac{8K2hd}{R} = \frac{4 * 0.4 * 0.5^2}{0.02} + \frac{8 * 2 * 0.50 * 1.50}{0.02} = 620m^2$$

Por tanto por el método Hooghoudt se llega a una solución prácticamente igual a la correspondiente al método de Ernst. Sin embargo a veces aparecen diferencias. El método

de Ernst aunque más laborioso es preferible al de Hooghoudt por su mayor precisión, pues tiene en cuenta un mayor número de los muchos factores que intervienen.

6. Calcular el caudal por dren, con una longitud de dren de $L = 360\text{m}$.

$$Q_o = 0.000073 * \frac{K * D}{L} h_o L \quad (1)$$

$$K = 0.6\text{m/d.}$$

$$L = 30\text{m.}$$

$$l = 360\text{m.}$$

Como valor de h_o se toma el mayor calculado para el Riego y para la lluvia. Para el Riego el mayor es $h_o = 0.47\text{m}$ y para la lluvia, es mayor h_o es el inicial, es decir $h_o = 0.57\text{m}$.

Por lo tanto se toma $h_o = 0.57\text{m}$.

$$D = D_1 + D_2 \quad (2)$$

Como el valor de D_2 se admite 2.05m . En realidad D_2 debe ser algo menor, debido a que el espaciamiento calculado se redujo de 35m a 30m . No obstante, la diferencia es pequeña y al aceptar ese valor algo mayor dará lugar a un Q_o también algo mayor, lo que supone estar de lado de la seguridad.

D_1 , en el momento más desfavorable es igual a $h_o = 0.57\text{m}$.

$$D = D_1 + D_2 = 2.05 + 0.57 = 2.62\text{m} \quad (3)$$

Sustituyendo estos valores en (1)

$$Q_o = 0.000073 * \frac{0.6 * 2.62}{30} * 0.57 * 360 = 0.00078 \text{ m}^3/\text{sg}$$

Caudal equivalente a 0.78l/sg .

Aunque el cálculo termina aquí, y a pesar de que aún no se ha estudiado la teoría del cálculo del diámetro de los drenes, vamos a efectuar el cálculo sin detenernos en muchas explicaciones, con el objetivo de comprobar que el radio del dren es $r = 0.04\text{m}$, hipótesis que se hizo para el cálculo del espaciamiento.

Suponemos drenes cerámicos, con una pendiente $i = 0.001$. El diámetro es:

$$d = 0.1913 * Q_o^{0.368} * i^{-0.211} = 0.1913 * 0.00078^{0.368} * 0.001^{-0.211} = 0.059\text{m.} \quad (4)$$

Por seguridad se aumenta un 10%.

$$0.059 * 1.1 = 0.065$$

Se emplea el menor diámetro comercial superior a 0.065m , que es de 0.08m .

Por tanto, el radio es: $r = 0.04\text{m}$.

III.3 Ejercicios propuestos.

1. Calcular la nueva profundidad freática si se conoce que al momento de efectuar la lectura, la humedad del suelo es 30% y la capa freática se encuentra a una profundidad de 1.50 m. se conoce además que: $\alpha = 1.40 \text{ g/cm}^3$; $\delta = 2.67 \text{ g/cm}^3$; Humedad a 15 atm. = 22%; Humedad a $\frac{1}{3}$ atm. = 40%.

Interpretando los datos anteriores, se tienen que:

Humedad a 15 atm. = PM = 22%

Humedad a $\frac{1}{3}$ atm. = CC = 40%

Por tanto:

$$\varepsilon = 100 * \left(\frac{\alpha}{\delta}\right) = 100 * \left(\frac{1.40}{2.67}\right) = 48\%$$

: $\mu = \varepsilon - \text{CC} = 0.48 - 0.40 = 0.08$; De lo inicialmente expuesto se deduce que si la humedad presente en el suelo es = 30% y la capacidad de almacenamiento del mismo es CC = 40%, el perfil del suelo todavía puede retener un 10% de su volumen de agua. Como la profundidad hasta la capa freática es = 1.50 m (1 500 mm), la cantidad de agua necesaria para elevar la humedad del perfil del suelo a Capacidad de Campo (CC) se puede estimar de: $1500 * (0.4 - 0.3) = 150 \text{ mm}$. Por lo tanto si se aplica un riego de $I = 180 \text{ mm}$, los 150 mm iniciales se consumirían en elevar la humedad del perfil del suelo hasta la Capacidad de Campo, de manera que los 30 mm restantes no podrían ser retenidos y por lo tanto se infiltraría hasta alcanzar la capa freática, y su elevación estaría dada por: $h = \frac{R}{\varepsilon} = \frac{30}{0.08} = 375 \text{ mm}$. Como respuesta la nueva profundidad freática se deduce de: $P_2 = P_1 - h = 1.50 - 0.375 = 1.125 \text{ m}$.

2. Calcular la nueva profundidad freática si se conoce que al momento de efectuar el riego el Agua Útil ha descendido hasta $\frac{2}{3}$ del máximo y que la Dosis de Riego (I), se va a aplicar con un exceso del 20% para satisfacer las exigencias de lavado del suelo. La capa freática se encuentra a una profundidad de 1.30 m. se conoce además que: $\alpha = 1.45 \text{ g/cm}^3$; $\delta = 2.60 \text{ g/cm}^3$; Humedad a pF = 2.5 = 36%; Humedad a pF = 4.2 = 17%.

Interpretando los datos anteriores, se tienen que:

Humedad a pF = 2.5 = CC = 36%

Humedad a pF = 4.2 = PM = 17%

3. Calcular la nueva profundidad freática si se conoce que la Evapotranspiración del Cultivo ($ET_c = 150$ mm/mes), se riega con una frecuencia de ($IR = 12$ días), se riego con un exceso del 30% y la profundidad freática antes de un riego ($P_1 = 1.20$ m), se conoce además que: $\epsilon = 49\%$; $CC = 38\%$; $PM = 23\%$.

4. Determine la cantidad anual de sales aportadas por el riego y la eliminadas en el drenaje, en una parcela de riego donde existe un suelo de textura media (FRANCO) y para el cual se permite una salinidad en el extracto de saturación del suelo ($CE_e = C_e = 4$ dS/m. La capa freática está muy profunda por tanto no se consideran aportes capilares ($G = 0$). Asuma los siguientes datos: Evaporación anual ($E = 1400$ mm, Precipitación anual ($P = 500$ mm, Conductividad eléctrica del agua de riego ($C_i = 1.0$ Ds/m, Porosidad ($\epsilon = 43\%$, Capacidad de Campo ($CC = 22\%$, Eficiencia de lavado ($f = 0.8$). Determine además que ocurriría si el riego se aplicara de manera que el agua de lavado (R) fuese únicamente el 10% del agua de riego.

Datos:

Suelo de textura media (FRANCO)

$(CE_e) = C_e = 4$ dS/m

$G = 0$

Evaporación anual ($E = 1400$ mm

Precipitación anual ($P = 500$ mm

Conductividad eléctrica del agua de riego ($C_i = 1$ Ds/m

Porosidad ($\epsilon = 43\%$, 0.43

Capacidad de Campo ($CC = 22\%$, 0.22

Eficiencia de lavado ($f = 0.8$

CONCLUSIONES: ¡Error! Marcador no definido.

1. Se elaboró el Programa Analítico de la asignatura Ingeniería de Drenaje Agrícola teniendo en cuenta las particularidades de la Disciplina Riego y Drenaje establecidas en el nuevo Plan de Estudios E.
2. Se logró actualizar el fundamento teórico de las tecnologías de Saneamiento Agrícola, así como los procedimientos para su dimensionamiento.
3. Se concretaron ejercicios resueltos y propuestos que facilitan el fortalecimiento de las habilidades de los estudiantes en el diseño de sistemas de saneamiento agrícola.
4. Se logró confeccionar un documento de apoyo a la docencia, teniendo la posibilidad de utilizar el mismo para el estudio de la asignatura. El mismo cumple con los objetivos que se orientan en el plan de estudios de la carrera de Ingeniería Hidráulica referidos a los Sistemas de Drenaje Agrícola.

RECOMENDACIONES:

Rgimen variable, sistematización y consulta de otros autores que han investigado sobre el tema

BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA

1. Allen, G. Richard, Pereira, S. Luis, Raes, Dirk y Smith Martin (1998): "Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements". Studio FAO Riego y Drenaje. No. 56, ROMA, 302 p.
2. Javier Ramón Pérez Argelí (2016): Manejo de la descarga de aguas superficiales e internas de los sistemas arroceros con vinculación al drenaje costero. Tesis en opción al título de ingeniero hidráulico. U. Oriente. FCO. Departamento de Ingeniería Hidráulica.
3. Mailyn Matos Reyes (2016-2017): Propuestas para el manejo del riego con aguas de salinidad media en la UEB Cultivo Protegido Cabacú. Tesis en opción al título de ingeniero hidráulico. U. Oriente. FCO. Departamento de Ingeniería Hidráulica.
4. José David Gonzales Villatorio (septiembre del 2009): Metodología para la investigación de la determinación de caudales de Drenaje Agrícola. Trabajo de graduación. Universidad de San Carlos de Guatemala. Departamento de Ingeniería Civil.
5. Ankum, P., 1995 Flow Control in Irrigation and Drainage, IHE, The Netherlands.
6. Chow, Ven Te, 1959, Open Channel Hydraulic, McGraw Hill, New York. USA.
7. Dahmen, E. R., 1995 "Irrigation and Drainage Systems I", IHE, the Netherlands.
8. Depeweg, H.W.Th., 1995. "Field Irrigation and Drainage (Surface Irrigation methods). IHE, The Netherlands.
9. Depeweg, H.W.Th., 1996. "Field Irrigation and Drainage (Lowhead & Overhead Irrigation methods)". IHE, The Netherlands.
10. Hoevenaars, J., Depeweg, H.W.Th., 1995. "Field Irrigation and Drainage (Basic Principles). IHE, The Netherlands.
11. Direction national de Riego. Corporation de foment de la producción (2001): Drenaje en suelos agrícolas. Instituto de investigaciones agropecuarias INIA-CARRILLANCA.
12. Lejeune, 1994, Basic Hydraulic, IHE, the Netherlands.
13. Manual técnico de hidráulica. Tomo II. INRH.
14. Oosterbaan, R.J., Ritzema, H.P. "Exercise Subsurface Drainage Case Study Pan de Azúcar". Lecture Notes, IHE, Delft. THE NETHERLANDS, 1998.
15. Pavón, Carlos. Manual de explotación de los sistemas de riego y drenaje. Tomo II.
16. Pizarro, C.F. "Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos". 2 a Edición. Editorial Agrícola Española, S.A., Madrid, 1985, 541 p.

Marzo / 1995.

17. Proyecto del sistema de riego La Mula. ENPA. Holguín, Enero / 1996.

18. Ritzema, H.P. "Drainage of Irrigated Lands". Lecture Notes, IHE, Delft. THE NETHERLANDS, 1997.

19. Ritzema, H.P. "Drainage Principles and Applications". ILRI Publications

20. Ritzema, H.P., Kseiik, R.A.L. "El Drenaje de las Tierras de Regadío". Manual de Campo No.9, FAO Manejo del Agua de Riego, 1996, 80 p.

21. Van den Bosch, Hoevenaars, J., Browser, C. "Canals". Estudio FAO Riego y Drenaje. Training Manual No. 7, ROMA, 1992, 80 p.

22. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. 2. Edición, Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid 1985. Fernando Pizarro Doctor Ingeniero Agrónomo.

23. La explotación del agua subterránea. Un nuevo enfoque. Primera Parte. Diosdado Perez Franco.

24. Ritzema, H.P. "Drainage Principles and Applications". ILRI Publications 16, Second Edition (Completely Revised), 1994, 1125 p.

25. Obdulio Marcos Rodríguez Escobar (noviembre del 2004): Drenaje Superficial en tierras agrícolas. Tesis en opción al título de ingeniero Agrónomo en Irrigación. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS;Error! Marcador no definido.:

1. Arnolvis Quesada Cabrera (2009): Sistemas de Riego y Saneamiento Agrícola. Tesis en opción al título de ingeniero hidráulico. U. Oriente. FCO. Departamento de Ingeniería Hidráulica.
2. Javier Ramón Pérez Argelí (2016): Manejo de la descarga de aguas superficiales e internas de los sistemas arroceros con vinculación al drenaje costero. Tesis en opción al título de ingeniero hidráulico. U. Oriente. FCO. Departamento de Ingeniería Hidráulica.
3. Mailyn Matos Reyes (2016-2017): Propuestas para el manejo del riego con aguas de salinidad media en la UEB Cultivo Protegido Cabacú. Tesis en opción al título de ingeniero hidráulico. U. Oriente. FCO. Departamento de Ingeniería Hidráulica.
4. José David Gonzales Villatorio (septiembre del 2009): Metodología para la investigación de la determinación de caudales de Drenaje Agrícola. Trabajo de graduación. Universidad de San Carlos de Guatemala. Departamento de Ingeniería Civil.
5. Dirección nacional de Riego. Corporación de fomento de la producción (2001): Drenaje en suelos agrícolas. Instituto de investigaciones agropecuarias INIA-CARRILLANCA.
6. José Carlo Santander (2017): Diseño e instalación del sistema de drenaje y base del Estadio Institución Educativa CARLOS-PUNO. Universidad nacional de ALTIPLANO. Escuela profesional de Ingeniería Agrícola.
7. Obdulio Marcos Rodríguez Escobar (noviembre del 2004): Drenaje Superficial en tierras agrícolas. Tesis en opción al título de ingeniero Agrónomo en Irrigación. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

ANEXOS:

Tabla 1.1 Importancia de los sistemas de saneamiento agrícola (Vigoa 2000)

No	Importancia
1	Con un buen saneamiento agrícola se logra eliminar la salinidad de los suelos La salinidad en los suelos es consecuencia de un drenaje deficiente, en los terrenos mal drenados se acumulan sales disueltas en el agua de riego o de escorrentía, pudiendo salinizar la solución del suelo y dosificar el complejo de cambio. La salinidad tiene efectos negativos en la fisiología de las plantas por lo que es necesaria su eliminación.
2	Además con el saneamiento agrícola se erradica la deficiencia de oxígeno, porque cuando el oxígeno disponible disminuye, por el exceso de agua, por debajo de unos niveles que son distintos para cada planta, las raíces disminuyen su actividades fisiológicas. Con la disminución del contenido de oxígeno la microflora desaparece gradualmente, siendo sustituida por organismos anaeróbicos, que pueden influir en la disponibilidad de ciertos elementos, cuyo equilibrio es importante para la planta.
3	Permite trabajar en suelos con contenidos de humedad altos, en muchos suelos arcillosos origina la destrucción de agregados y dispersión de partículas de suelo.
4	La humedad del suelo afecta de forma distinta a los agentes de enfermedades de las plantas, generando podredumbre, hongos e incluso enfermedades víricas. Gracias al saneamiento podemos evitar dichas enfermedades.
5	Los niveles excesivamente altos de agua en el suelo, incluso de corta duración, pueden ejercer una influencia en la producción, dependiendo de las fases de desarrollo de las plantas en el momento en que se producen

Tabla 1.3 valores del coeficiente de escurrimiento (C) para diferentes condiciones de topografía, suelo y vegetación. (Vigoa 2000).

VEGETACIÓN	PENDIENTE (%)	TEXTURA DEL SUELO		
		FRANCO ARENOSO	FRANCO LIMOSO	ARCILLOSO
Terrenos Cultivados	0 a 5	0.30	0.50	0.60
	5 a 10	0.40	0.60	0.70
	10 a 30	0.50	0.70	0.80
Praderas	0 a 5	0.10	0.30	0.40
	5 a 10	0.15	0.35	0.55
	10 a 30	0.20	0.40	0.60
Áreas Forestales	0 a 5	0.10	0.30	0.40
	5 a 10	0.25	0.35	0.50
	10 a 30	0.30	0.50	0.60

Tabla 1.4 valores del coeficiente de escurrimiento (C) para terrenos llanos y pocos ondulados. (Vigoa 2000).

VEGETACIÓN	PENDIENTE (%)	TEXTURA DEL SUELO		
		FRANCO ARENOSO	FRANCO LIMOSO	ARCILLOSO
Terrenos Cultivados	0 a 5	0.30	0.50	0.60
	5 a 10	0.40	0.60	0.70
	10 a 30	0.50	0.70	0.80
Praderas	0 a 5	0.10	0.30	0.40
	5 a 10	0.15	0.35	0.55
	10 a 30	0.20	0.40	0.60
Áreas Forestales	0 a 5	0.10	0.30	0.40
	5 a 10	0.25	0.35	0.50
	10 a 30	0.30	0.50	0.60

Tabla 1.5 Clasificación de los suelos según la clase hidrológica. (Vigoa 2000).

Grupos – Características	A	B	C	D
Velocidad de infiltración (húmedos)	Alta	moderada	baja	Muy baja
Transmisibilidad	Alta	moderada	baja	Muy baja
Profundidad	Muy profundos	profundos	moderada	Poco profundos
Drenaje interno	Muy bueno	bueno	moderado	malo
Textura	Arena y gravas	Medio arenosa	Medio arcillosa	Arcillas pesadas
Potencial de escurrimiento	bajo	Moderado bajo	Moderado alto	Alto
Nivel Freático	.....	.....	.....	Permanentemente alto

Tabla 1.6 Categorías de la velocidad de infiltración. (Vigoa 2000).

Categoría	Valor, mm/h.
Muy baja	< 2.5
Baja	2.5 – 12.5
Media(moderada)	12.5 – 25
Alta	> 25

Tabla 1.7 Humedad previa en el suelo para el cálculo de CN. (Vigoa 2000).

Lluvia caída durante 5 días antes, mm		
Terreno cultivado	Terreno sin cultivar	Condición
Menos de 35	Menos de 12.5	I(seco)
35-52.5	12.5-27.5	II(medio)
Más de 52.5	Más de 27.5	III(húmedo)

Tabla 1. 8 Valores de CN para suelos de la categoría II de humedad previa. (Vigoa 2000).

Tipo de vegetación	Forma de cultivo	Estado	Clase hidrológica del suelo			
			a	B	C	D
Berbecho	Surcos rectos	Malo	77	86	91	94
Cultivos en surcos(viandas y hortalizas)	Surcos rectos	Bueno	72	81	88	91
	Surcos rectos	Malo	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Bueno	70	79	84	88
	Curvas de nivel	Malo	65	75	82	86
	Curvas de nivel y bancales	Bueno	66	74	80	82
	Curvas de nivel y bancales	Malo	62	71	78	81
Cereales finos(maíz, caña)	Surcos rectos	Bueno	65	76	84	88
	Surcos rectos	Malo	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Bueno	63	74	82	85
	Curvas de nivel	Malo	61	73	81	84
	Curvas de nivel y bancales	Bueno	61	72	79	82
	Curvas de nivel y bancales	Malo	59	70	78	81

Leguminosas de siembra densa o prados en rotación (frijoles)	Surcos rectos	Bueno	66	77	85	89
	Surcos rectos	Malo	58	72	81	85
	Curvas de nivel	Bueno	64	75	83	85
	Curvas de nivel	Malo	55	69	78	83
	Curvas de nivel y bancales	Bueno	63	73	80	83
	Curvas de nivel y bancales	Malo	51	67	76	80
Pastos o pastizales		Bueno	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Malo	39	61	74	80
	Curvas de nivel	Bueno	47	67	81	88
	Curvas de nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas de nivel	Malo	6	35	70	79
Prado (permanente)		Bueno	30	58	71	78
		Malo	45	66	77	83
Bosques (Fincas boscosas)		Regular	36	60	73	79
		Malo	25	55	70	77

Tabla 1.9 Relación entre los valores de CN para las diferentes categorías de humedad previa. (Vigoa 2000).

CN para la condición		CN	CN para la condición		CN
II	I	III	II	I	III
100	100	100	58	38	76
98	94	99	56	36	75
96	89	99	54	34	73
94	85	98	52	32	71
92	81	97	50	31	70
90	78	96	48	29	68
88	75	95	46	27	66
86	72	94	44	25	64
84	68	93	42	24	62
82	66	92	40	22	60
80	63	91	38	21	58
78	60	90	36	19	56
76	58	89	34	18	54
74	55	88	32	16	52
72	53	86	30	15	50
70	51	85	25	12	43
68	48	84	20	9	37
66	46	82	15	6	30
64	44	81	10	4	22
62	42	79	5	2	13
60	40	78	0	0	0

Anexo 4:

Tabla 1.10. Profundidad recomendada del nivel de la capa freática para diferentes cultivos y suelos (TAMAJON 1995).

Cultivos	Textura			
	Arenoso	Medio	Arcilloso	Turboso
Pasto	0.7	0.5	0.6	0.7
Viandas y vegetales	0.5-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.8-0.9
Frutales	0.8-0.9	0.9-1.0	1.1-1.2	0.9-0.12

Tabla 1.11. Profundidad de las raíces (cm) de los cultivos más usuales. (Pizarro 1985).

	Zona de ramificación		Profundidad
Cultivo	Densa	Moderada	Extrema
Trigo	30	30-90	120-150
Centeno	50	50-75	150-225
Girasol	30	30-90	275
Remolacha Az.	30	30-120	150-180
Caña de Az.	70	-	-
Alfalfa	90	90-180	180-275
Trébol	90	-	120-245
Zanahoria	90	-	150
Cebolla	60	60-90	90-230
Col	60	60-90	90-230
Coliflor	30-50	50-90	90-140
Lechuga	20-30	30-120	230
Tomate	60	60-90	120
Pimiento	30-45	45-90	120
Melón	20-30	30-90	90-120
Judías	30	30-75	90
Guisantes	30	30-7	90
Rábano	15	-	60
Espinacas	25	360	105
Patatas	25-30	5-60	100
Fresas	30	-	90

Melocotón	90	-	-
Manzano, Olivo	100	-	-
Agrios, Vid	75	-	-

Tabla 1.12.- Profundidades recomendadas de la capa freática para distintos grupos de cultivos. (Pizarro 1985) (Orientativo).

CULTIVOS	PROFUNDIDAD
Pastos Permanentes	
textura fina	60 a 80 cm
suelos arenosos	suelos arenosos
Tréboles	70 a 90 cm
Cultivos Extensivos	
Maíz y Tabaco	80-100 cm
Cereales	elevada resistencia a la humedad.
Patatas	40-50
Arroz	tolera inundación.
Caña de Az.	tolera seminundación.
Alfalfa	su profundidad es adaptable.
Hortalizas	
Lechuga, fresas	40 a 50 cm
Zanahoria y Col	60 cm
Judías, Pimientos	70 a 80 cm
Arboles	

Frutales	150 cm ó más
De frutos secos (Nogal)	250 a 300 cm
Tropicales (Cocoteros, Mangos y Palmeras)	Elevada resistencia a la humedad.
De terrenos húmedos (Álamo, Sauce, Fresno)	tolera inundación.

Tabla 1.13.- Algunos valores usuales de (p) en función del suelo, el cultivo y (N). (Pizarro 1985), (orientativo).

Cultivos	Textura	N	"p" (m)
Pastos	Fina	4	0.70
	Arenosa	4	0.50
Hortalizas		2	0.50 - 0.80
Cultivos Extensivos		2	0.90 - 1.20
Frutales		3	1.20 - 1.50

NOTA: La profundidad " p " se puede tomar también como el 80 % de la profundidad de las raíces.

Tabla 1.14.- Profundidad de la capa freática para N = 5 días en distintas clases de cultivos. (Pizarro 1985), (orientativo).

Días después de la lluvia	Profundidad de la capa freática (metros)		
	Clase A	Clase B	Clase C
0	0.30	0.50	0.90
1	0.50	0.80	1.10
2	0.70	1.00	1.20
3	0.80	1.10	1.30

NOTA: Clase A.- Pastos y gran parte de las hortalizas.

Clase B.- Gran parte de los cultivos extensivos.

Clase C.- Los frutales.

Tabla 1.15 (Vigoa 2000)

Nomenclatura	área de la cuenca en Km ²	Longitud del río en Km
Ríos pequeños	Menor de 50	Menor de 10
Ríos medianos	De 50 a 200	De 10 a 40
Ríos grandes	Mayor de 200	Mayor de 40

Para seleccionar la probabilidad de diseño se sigue el criterio siguiente:

Tabla 1.16 (Vigoa 2000)

Objetivo a proteger	Categoría	Probabilidad (%)	
		Diseño	Comprobación
Obras de gran importancia (centrales eléctricas, etc.)	I	0.1	0.01
Zonas pobladas industriales importantes	II	1	0.1
Zonas pobladas pequeñas o zonas agrícolas importantes	III	2 a 5	1 a 3
Zonas agrícolas de menor importancia	IV	10	5

Tabla 1.17 (Vigoa 2000)

Variación de la pendiente de talud		
Material del dique	(m´) (seco)	(m) húmedo
Material homogéneo bien graduado	2.0	2.5
Arenoso con núcleo de arcilla	2.5	3.0
Homogéneo de arcilla	2.0	2.5
Ancho de la berma		
Ríos pequeños	3-10m	
Ríos medianos	10-20m	
Ríos grandes	Mayor de 20m	

Tabla 1.18 (Vigoa 2000)

Valores de la velocidad V, en función del diámetro medio de las partículas cuando el tirante es de 1m.			
Diámetro (mm)	Vo (m/s)	Diámetro (mm)	Vo(m/s)
		46	1.44
		48	1.47
		50	1.50
1.0	0.60	52	1.54
2.5	0.75	54	1.56
5	0.80	56	1.59
10	0.83	58	1.62
15	0.86	60	1.65
20	0.90	65	1.69
25	0.98	70	1.72
30	1.04	75	1.76
32	1.11	80	1.80
34	1.17	85	1.84
36	1.24	90	1.88
38	1.29	95	1.91
40	1.35	100	100
42	1.38	150	2.40
44	1.41	200	2.60